

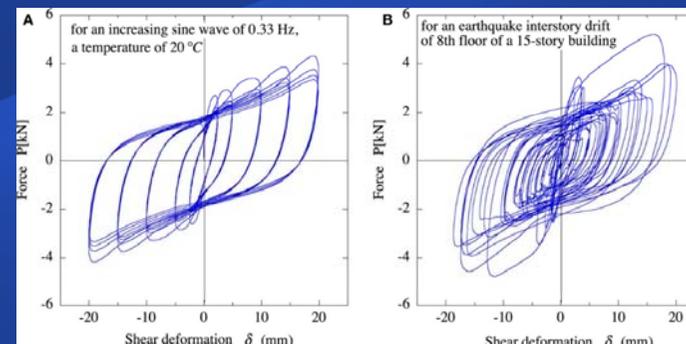
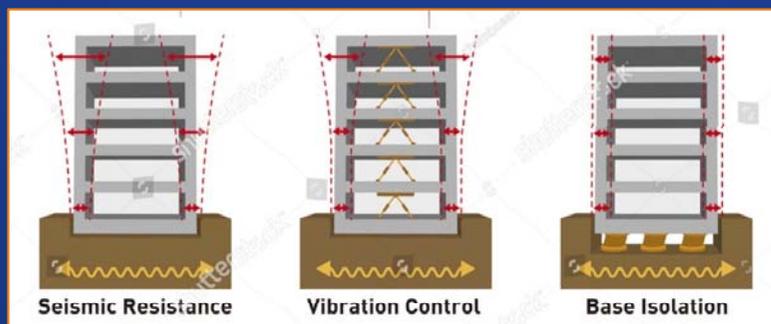


Con il patrocinio di



# Problemi aperti delle tecniche innovative di progettazione antisismica

Giuseppe Ricciardi



**UNIME** - Università degli Studi di Messina  
**CERISI** – Centro di Eccellenza Ricerca e Innovazione per Strutture e Infrastrutture di grandi dimensioni  
**EUROLAB** – Laboratorio prove per dispositivi dell'Ingegneria Strutturale



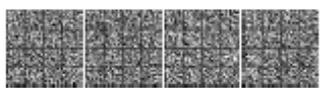
# Normativa di riferimento

- Norme Tecniche Italiane (NTC 2018 e Circolare 2019)



## CAPITOLO 11 – MATERIALI E PRODOTTI AD USO STRUTTURALE

- 11.9. DISPOSITIVI ANTISISMICI E DI CONTROLLO DELLE VIBRAZIONI**
- 11.9.1. TIPOLOGIE DI DISPOSITIVI**
- 11.9.2. PROCEDURA DI QUALIFICAZIONE**
- 11.9.3. PROCEDURA DI ACCETTAZIONE**
- 11.9.4. DISPOSITIVI A COMPORTAMENTO LINEARE**
- 11.9.4.1 PROVE DI ACCETTAZIONE SUI DISPOSITIVI
- 11.9.5. DISPOSITIVI A COMPORTAMENTO NON LINEARE**
- 11.9.5.1 PROVE DI ACCETTAZIONE SUI DISPOSITIVI
- 11.9.6. DISPOSITIVI A COMPORTAMENTO VISCOSO**
- 11.9.6.1 PROVE DI ACCETTAZIONE SUI DISPOSITIVI
- 11.9.7. ISOLATORI ELASTOMERICI**
- 11.9.7.1 PROVE DI ACCETTAZIONE SUI DISPOSITIVI
- 11.9.8. ISOLATORI A SCORRIMENTO**
- 11.9.8.1 PROVE DI ACCETTAZIONE SUI DISPOSITIVI
- 11.9.9. DISPOSITIVI A VINCOLO RIGIDO DEL TIPO A “FUSIBILE”**
- 11.9.9.1 PROVE DI ACCETTAZIONE SUI DISPOSITIVI
- 11.9.10. DISPOSITIVI (DINAMICI) DI VINCOLO PROVVISORIO**
- 11.9.10.1 PROVE DI ACCETTAZIONE SUI DISPOSITIVI



# Normativa di riferimento

- Normativa Europea
- Uni En 15129 (2009)

**NORMA EUROPEA**

**Dispositivi antisismici**

**UNI EN 15129**

---

DICEMBRE 2009

Versione bilingue dell'aprile 2012

Anti-seismic devices

---

La norma riguarda la progettazione dei dispositivi antisismici, inclusi nelle strutture con lo scopo di modificarne la risposta all'azione sismica. Specifica i requisiti funzionali e le regole generali di progettazione in situazioni sismiche, le caratteristiche dei materiali, i requisiti di fabbricazione e di esecuzione delle prove, nonché i criteri per la valutazione della conformità, di installazione e di manutenzione. Fornisce anche i criteri per la marcatura CE.

---

TESTO INGLESE E ITALIANO

---

La presente norma è la versione ufficiale in lingua inglese e italiana della norma europea EN 15129 (edizione novembre 2009).

---

ICS 91.120.25

---

UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione  
Via Sanno, 2  
20137 Milano, Italia

© UNI  
Riproduzione vietata. Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte del presente documento può essere riprodotta o diffusa con un mezzo qualsiasi, fotocopia, microfilm o altro, senza il consenso scritto dell'UNI.

---

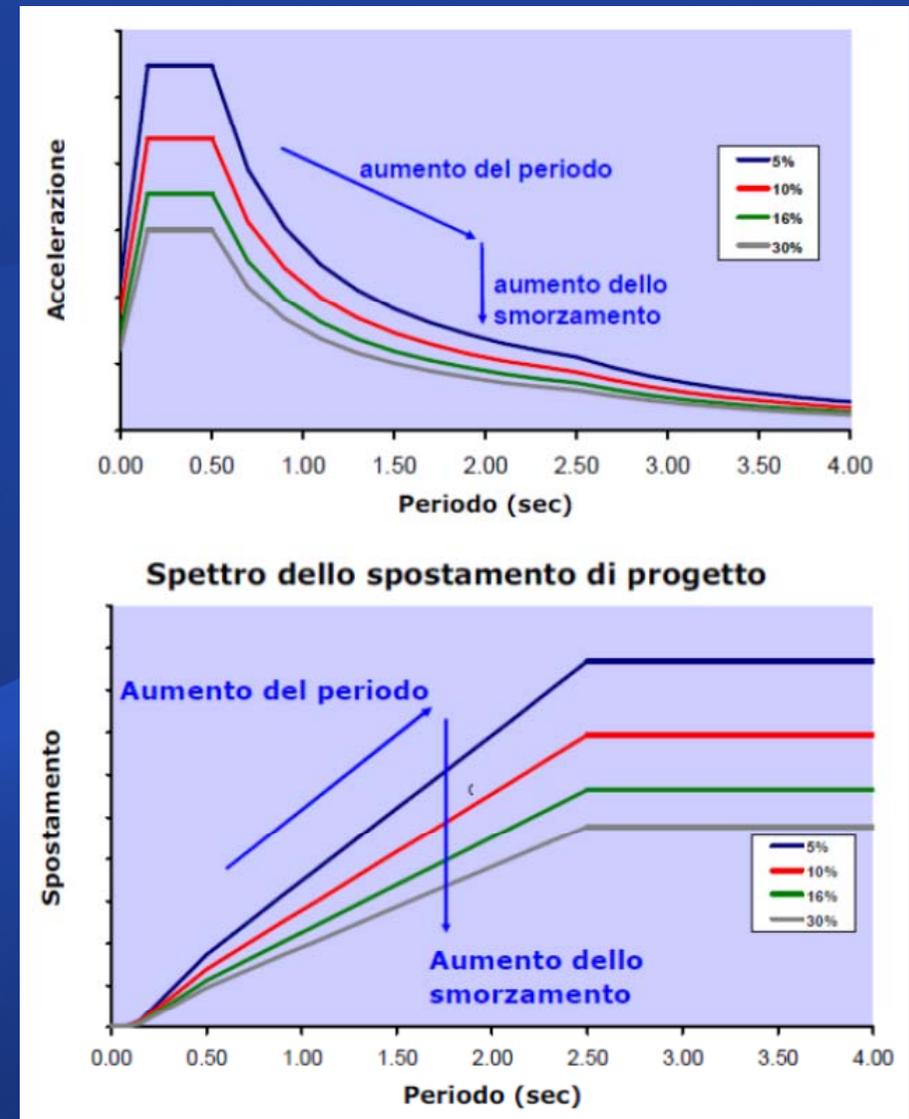
UNI EN 15129:2009
Pagina 1

prospetto 1 Tipi più comuni di dispositivi antisismici

Descrizione del dispositivo		Punto pertinente	Rappresentazione grafica			Note
			Vista in pianta	Vista in alzato		
				Direzione x	Direzione y	
Dispositivi di vincolo Permanente (PCD)	Fisso	5.1				Questo tipo di dispositivo corrisponde al tipo 8.1 (appoggio fisso) nel prospetto 1 della EN 1337-1:2000 (*)
	Mobile	5.1				Questo tipo di dispositivo corrisponde al tipo 8.2 (appoggio mobile) nel prospetto 1 della EN 1337-1:2000 (*)
Dispositivi di Vincolo a fusibile	Vincolo a fusibile meccanico (MFR)	5.2			-	
	Vincolo a fusibile idraulico (HFR)	5.2			-	
	Dispositivo di vincolo temporaneo (TCD)	5.3			-	Questo tipo di dispositivo è di solito denominato accoppiatore idraulico (STU)
Dispositivi dipendenti dallo spostamento (DDDs)	Dispositivo Lineare (LD)	6.1			-	
	Dispositivo Non lineare (NLD)	6.2			-	
Dispositivi dipendenti dalla velocità	Smorzatore fluido viscoso (FVD)	7.1			-	Questa rappresentazione grafica si applica anche al caso di smorzatori ad albero passante
	Smorzatore fluido-elastico (FSD)	7.1			-	
Isolatori Sismici	Isolatore Elastomerico	8.2				Gli isolatori sono illustrati nella condizione deformata per sottolineare la loro flessibilità laterale
	Appoggio gomma-piombo	8.2				
	Isolatore a scorrimento con superficie curva	8.3				I simboli si applicano ad ambedue i tipi con una o due o superfici curve
	Isolatore a scorrimento con superficie piana	8.4				I simboli si applicano sia al tipo 2.3 (appoggio a vaso multidirezionale) sia al tipo 3.5 (appoggio sferico multidirezionale) nel prospetto 1 della EN 1337-1:2000 (*)
Nota 1 (*)	Questo tipo di dispositivo corrisponderà al tipo F0 (appoggio fisso) nel prospetto 1 della versione revisionata della EN 1337-1.					
Nota 2 (*)	Questo tipo di dispositivo corrisponderà al tipo G.1 (appoggio mobile) nel prospetto 1 della versione revisionata della EN 1337-1.					
Nota 3 (*)	Questo tipo di dispositivo corrisponderà ai tipi P2 ed S.2 nel prospetto 1 della versione revisionata della EN 1337-1.					

## Dispositivi di isolamento secondo le NTC '08

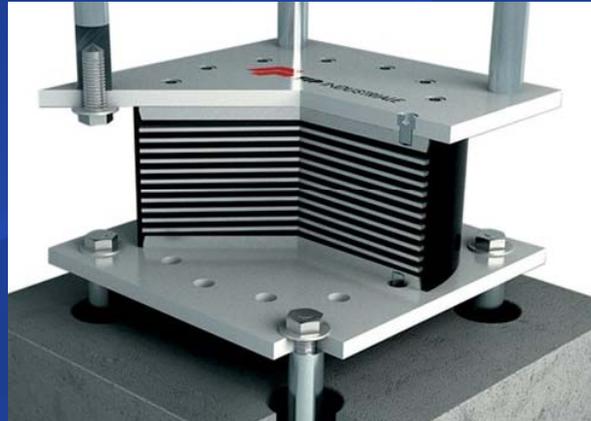
- La normativa attualmente vigente alla quale facciamo riferimento definisce “**Dispositivi di isolamento**” gli elementi che contribuiscono a modificare la risposta sismica di una struttura:
  - incrementando il **periodo fondamentale** della struttura
  - incrementando la **dissipazione** di energia
  - limitando gli **spostamenti** al solo dispositivo di isolamento
- Ogni dispositivo, dopo la realizzazione, viene testato tramite apposite prove di laboratorio, tali da dimostrare l'efficacia di esso in tutte le condizioni (di eccitazione sismica ed ambientali)



# Isolatori sismici elastomerici

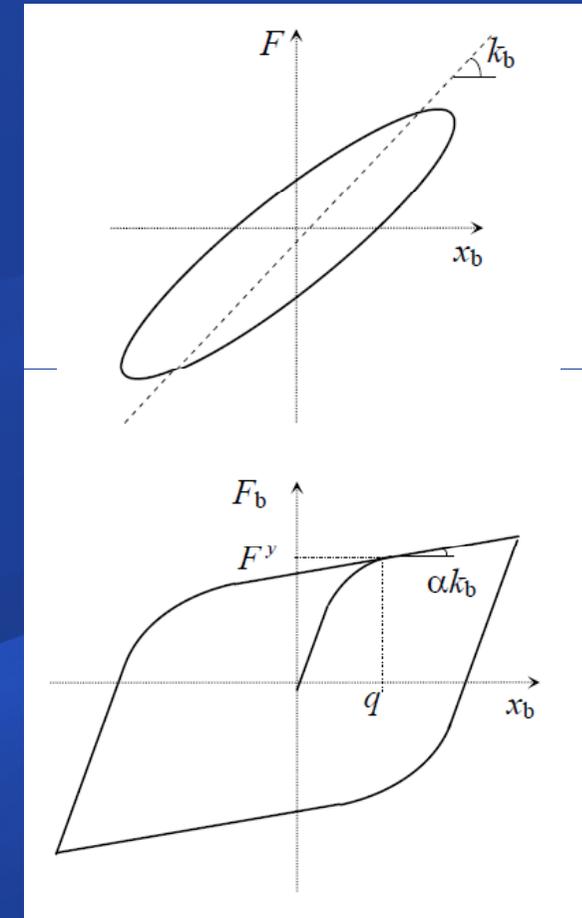
## LDRB - HDRB

Low/High-Damping  
Rubber Bearing



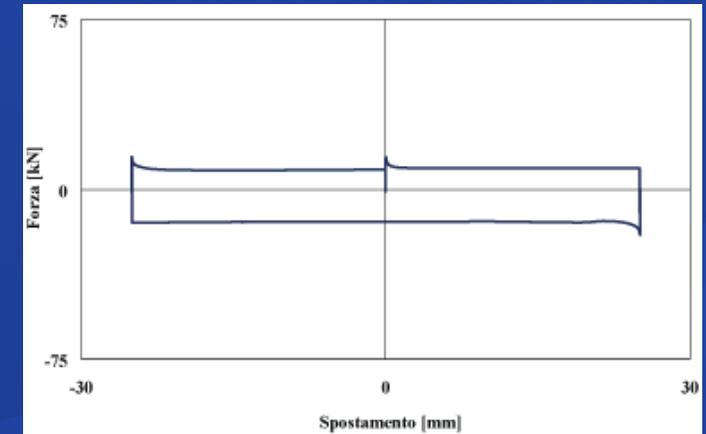
## LRB

Lead-Rubber  
Bearing

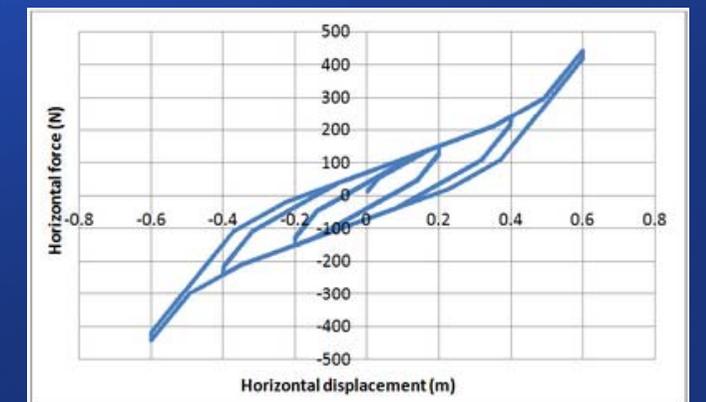
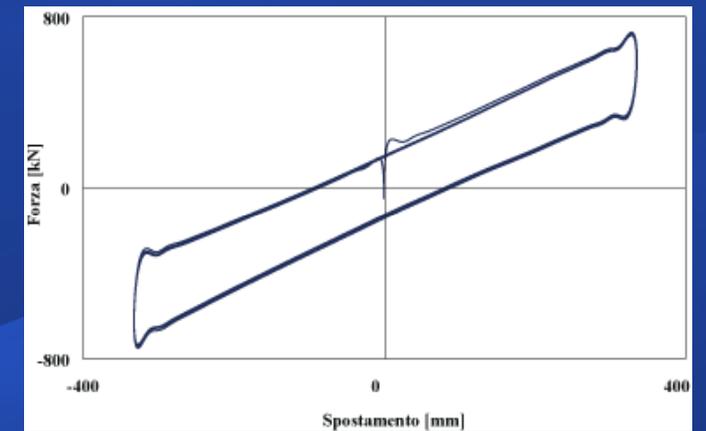
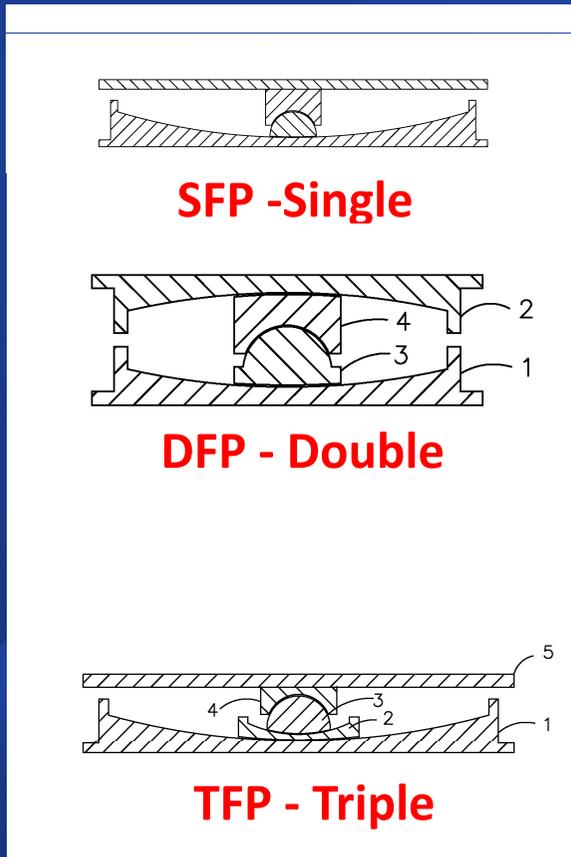


# Isolatori sismici a scorrimento

A SUPERFICIE PIANA  
(slitte)



A SUPERFICI CURVE  
Friction Pendulum (FP)



## Osservazioni derivanti dalla sperimentazione

- Le esperienze di laboratorio hanno mostrato che anche dispositivi di tipologia consolidata (isolatori elastomerici, a pendolo scorrevole) possono esibire **comportamenti problematici gravi**, con premature rotture dei dispositivi

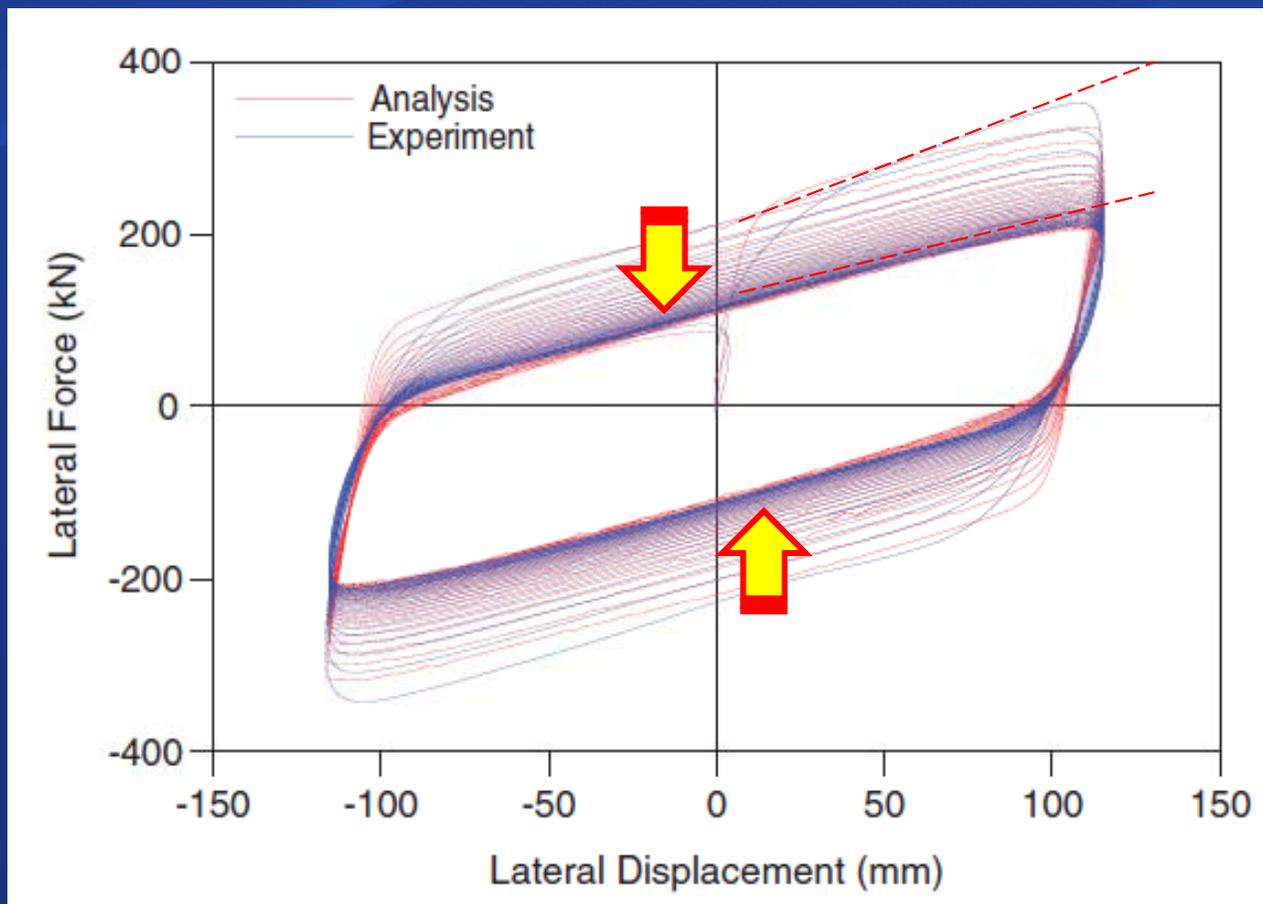


# Isolatori elastomerici Problematiche

# Isolatori elastomerici LRB

Conseguenze del riscaldamento del nucleo in piombo di un isolatore LRB soggetto a diversi cicli di carico

- All'aumentare del numero di cicli, il riscaldamento per deformazione plastica del nucleo di piombo riduce le sue capacità dissipative; si riduce l'area del ciclo di isteresi e, quindi, l'energia dissipata ad ogni ciclo

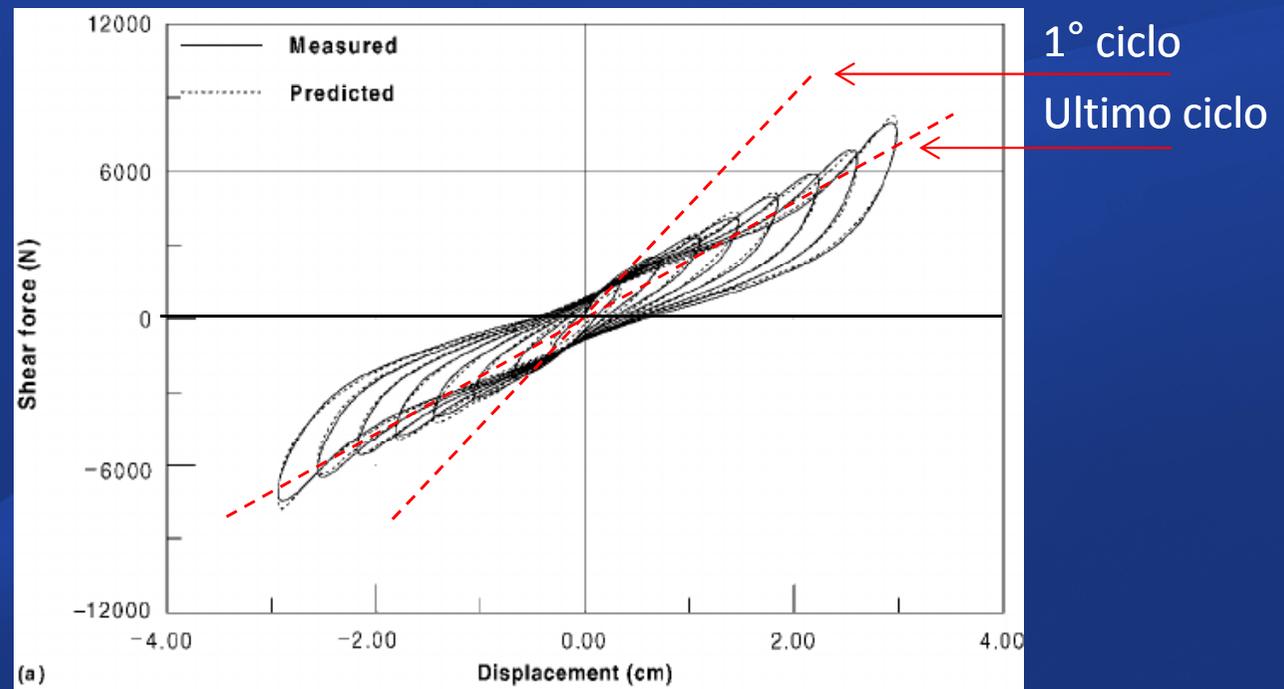


# Isolatori elastomerici HDRB

Effetti dovuti al danneggiamento progressivo del materiale per un HDRB



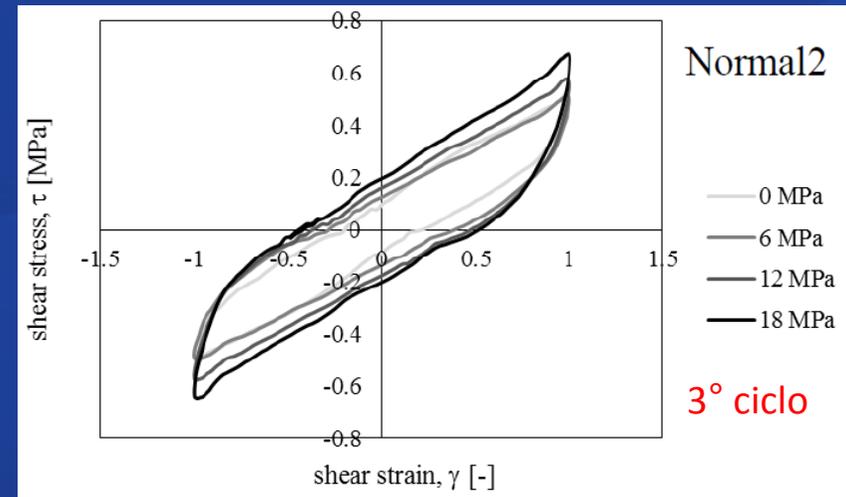
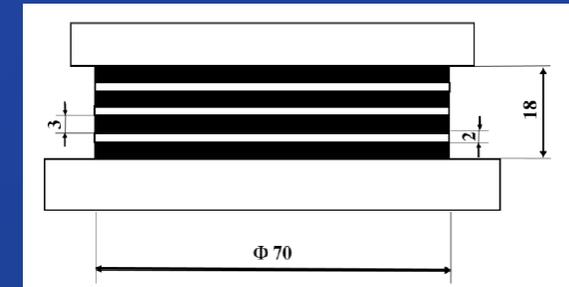
- HDRB costituito da gomma ad alto smorzamento per aggiunta di **filler**; questa inclusione rende il comportamento fortemente non lineare
- Nei primi cicli di carico, il **danneggiamento della microstruttura** interna produce una progressiva perdita di rigidità (**scragging effect**)
- Il danneggiamento produce inoltre una forte dipendenza del comportamento dalla storia di carico, in particolare dalla **max deformazione** subita lungo il percorso di carico (**Mullins effect**)



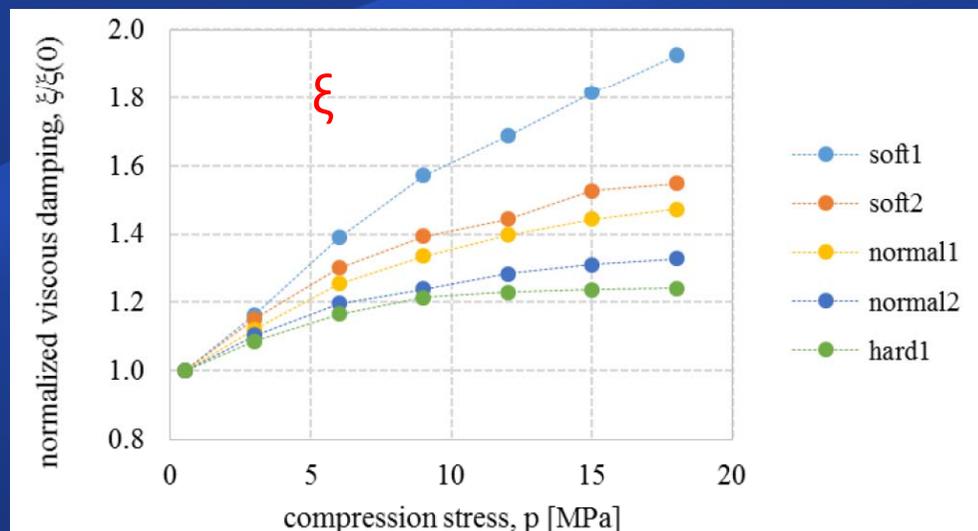
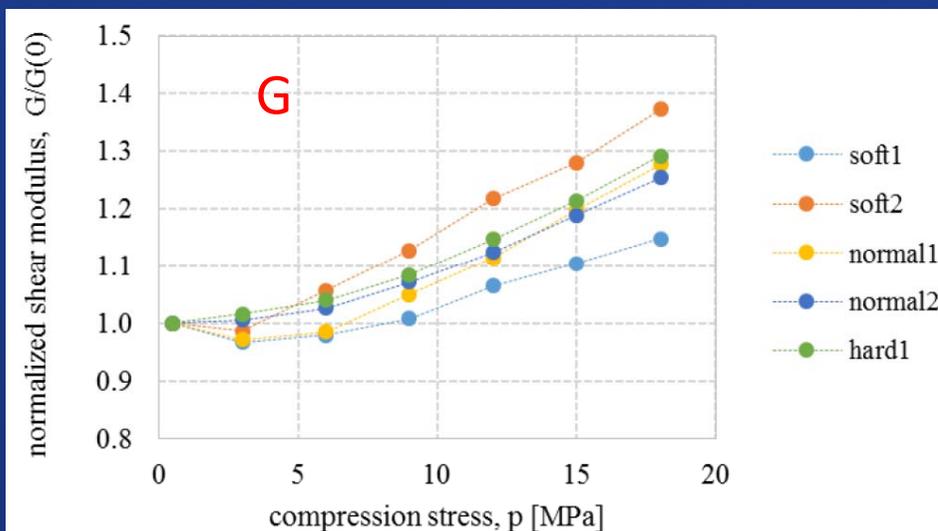
# Isolatori elastomerici HDRB

Effetti dell'intensità dello sforzo normale sul modulo a taglio e sullo smorzamento equivalente (HDRB)

- Crescono al crescere dell'intensità dello sforzo normale (si espande il ciclo di isteresi)



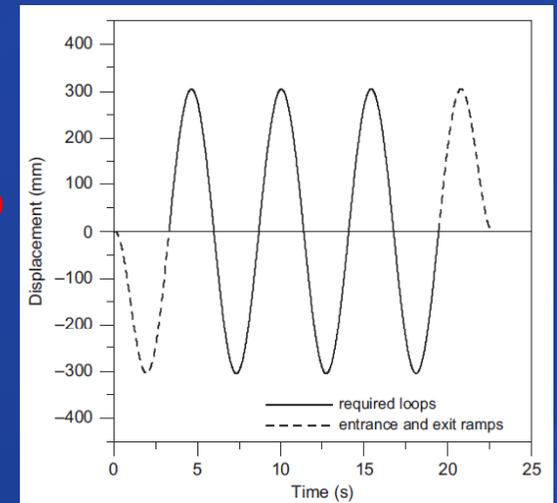
HDR Compounds	hardness [IRHD]	G [MPa]	$\xi$ [-]
Soft1	45	0.32	0.09
Soft2	50	0.37	0.15
Normal1	58	0.52	0.12
Normal2	65	0.72	0.17
Hard1	74	0.90	0.17



# Isolatori elastomerici LRB

Effetti del valore di picco della velocità sul valore di picco della forza (per diverse condizioni di carico assiale) (LRB)

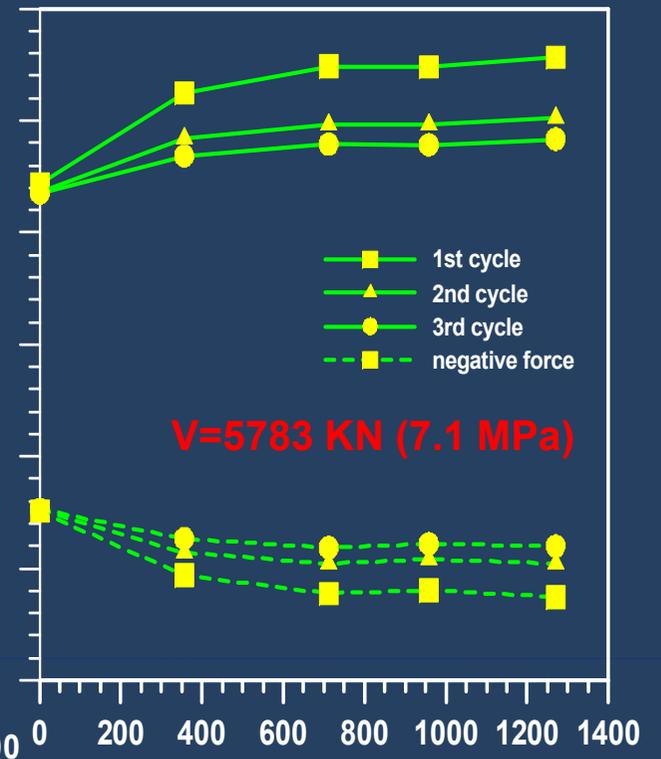
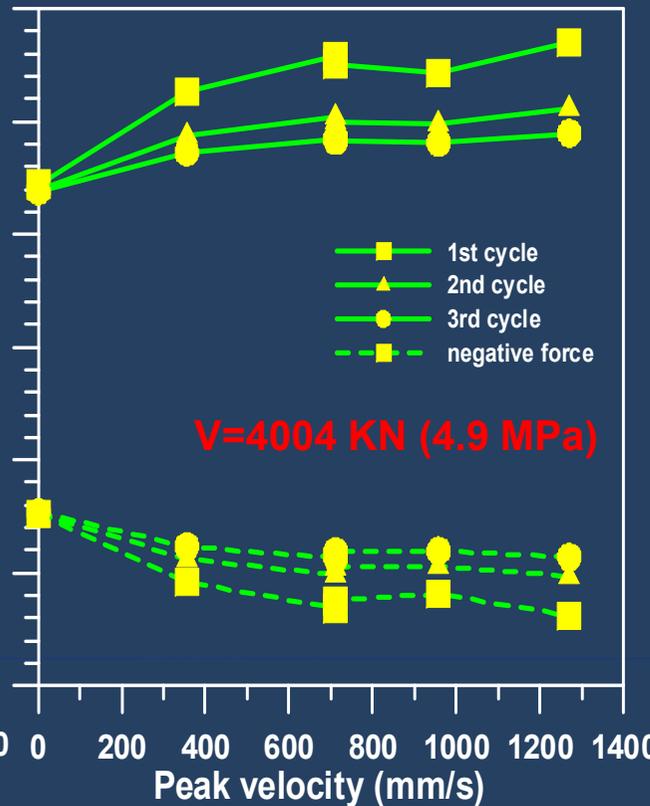
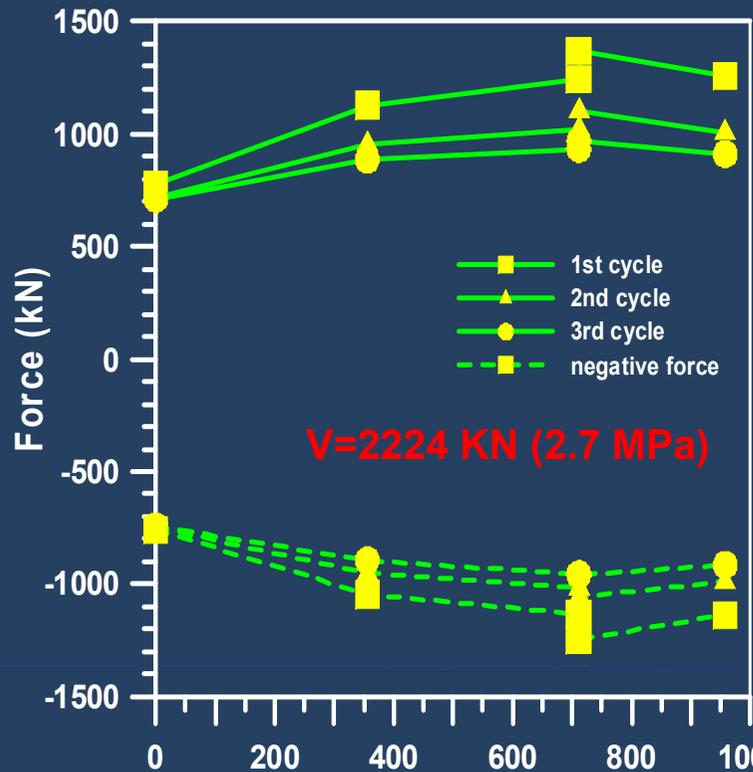
- Cresce al crescere del valore di picco della velocità



Max 70.6%  
45%  
30%

Max 73.8%  
45%  
30%

Max 64.5%  
45%  
30%

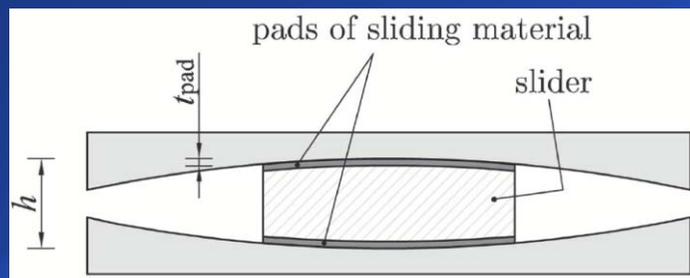


# **Isolatori a pendolo scorrevole**

## **Problematiche**

# Isolatori a pendolo scorrevole – Modello ideale

- Il modello più semplice che descrive il comportamento meccanico di un FP è basato sull'assunzione di un valore costante del carico verticale e del coefficiente di attrito (Coulomb simplified theory)



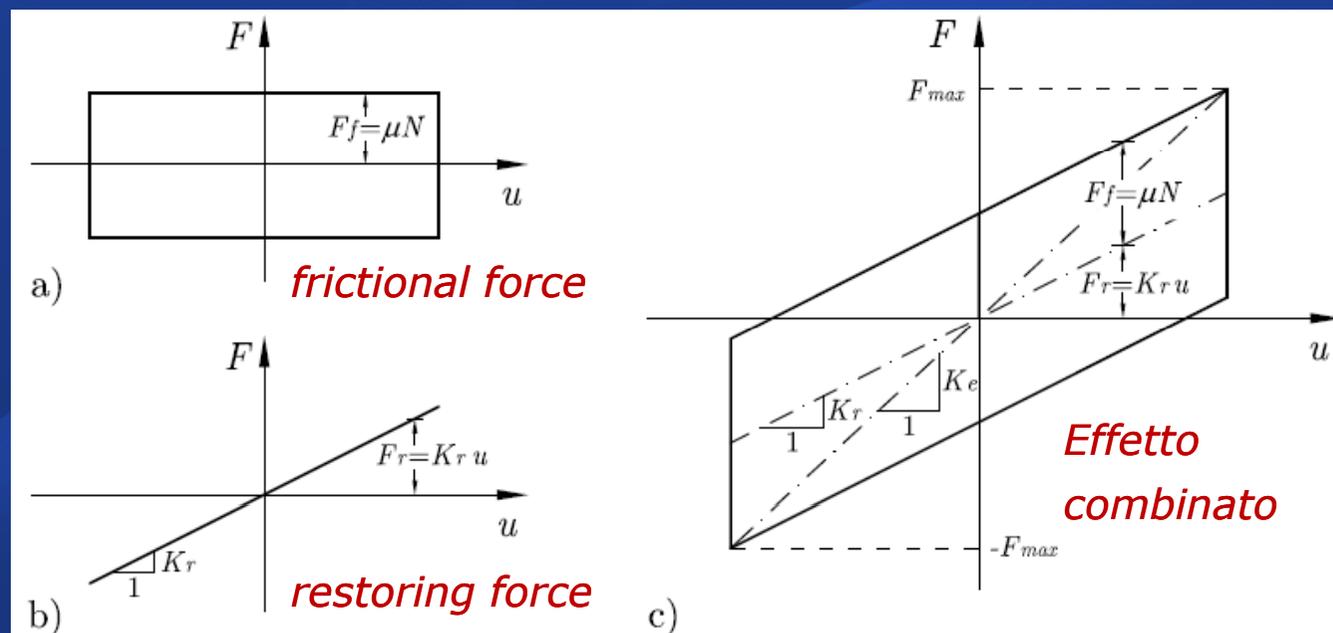
$$F = \underbrace{F_r}_{\text{restoring force}} + \underbrace{F_f}_{\text{frictional force}} = \frac{N}{R_{\text{eff}} \cos \theta} u + \mu N \text{sgn}(\dot{u})$$

- Rigidezza e smorzamento efficaci

$$K_{\text{eff}} = \frac{N_d}{R_{\text{eff}} \cos \theta} + \mu \frac{N_d}{u_d}$$

$$\xi_{\text{eff}} = \frac{2\mu R_{\text{eff}} \cos \theta}{\pi(\mu R_{\text{eff}} \cos \theta + u_d)}$$

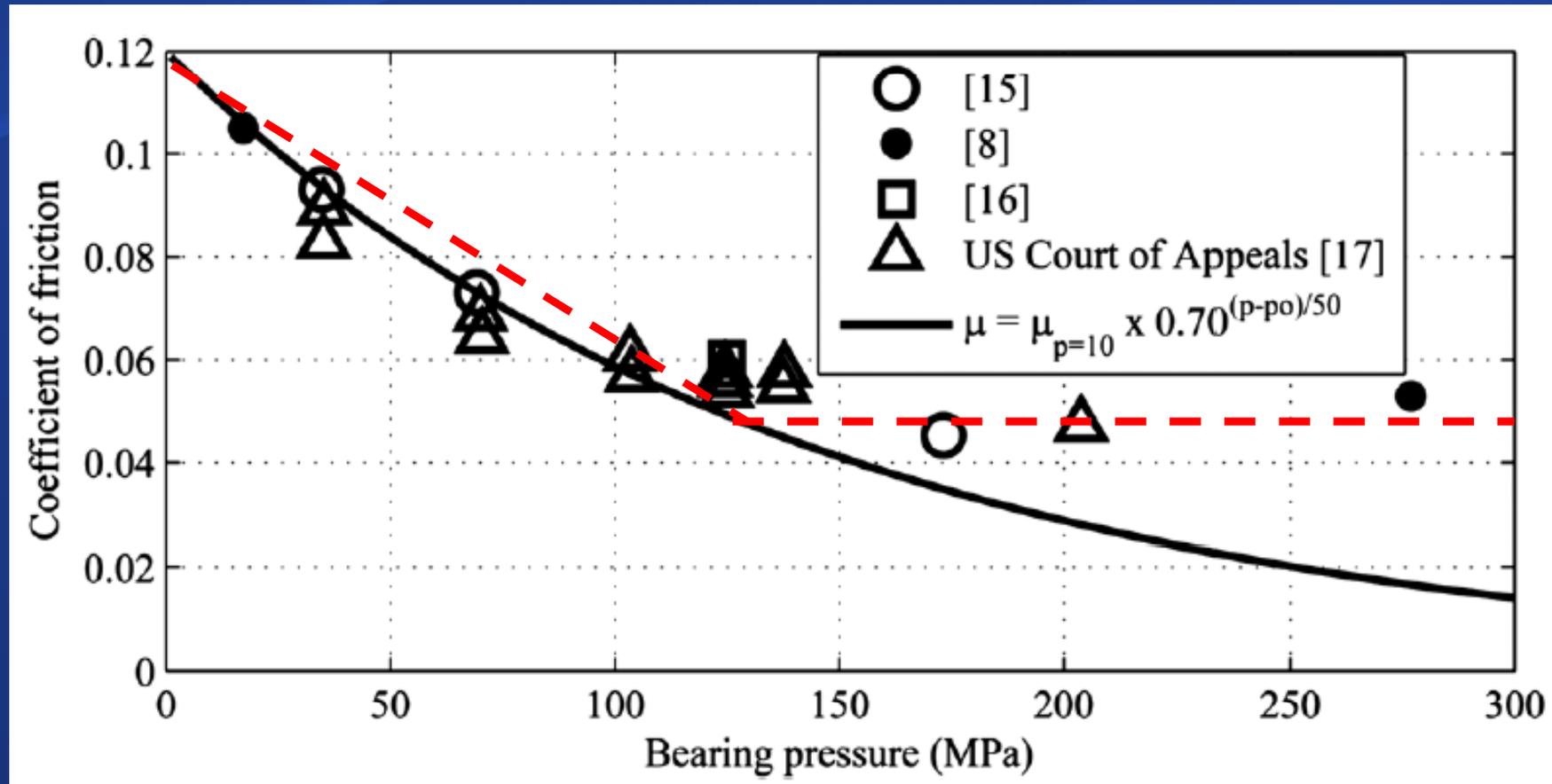
- Ma il coefficiente di attrito non si mantiene costante!!!



# Isolatori a pendolo scorrevole

## Effetti del carico assiale sul coefficiente di attrito (**Pressure Effect**)

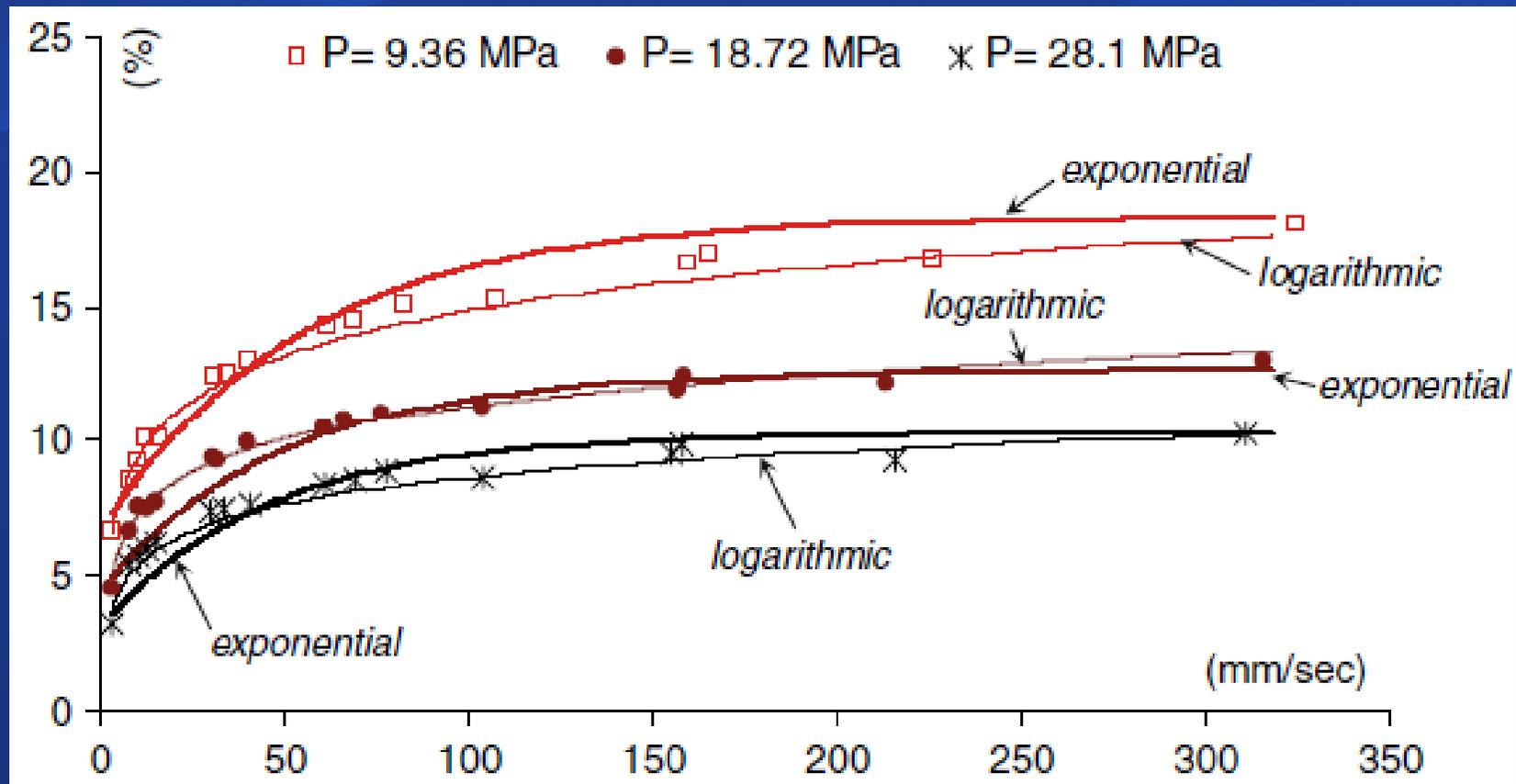
- Diminuisce al crescere della pressione, drasticamente fino ad una riduzione di oltre il 50% per una pressione di 130 MPa, oltre la quale si attesta ad un valore pressoché costante



# Isolatori a pendolo scorrevole

## Effetti della velocità sul coefficiente di attrito (**Velocity effect**)

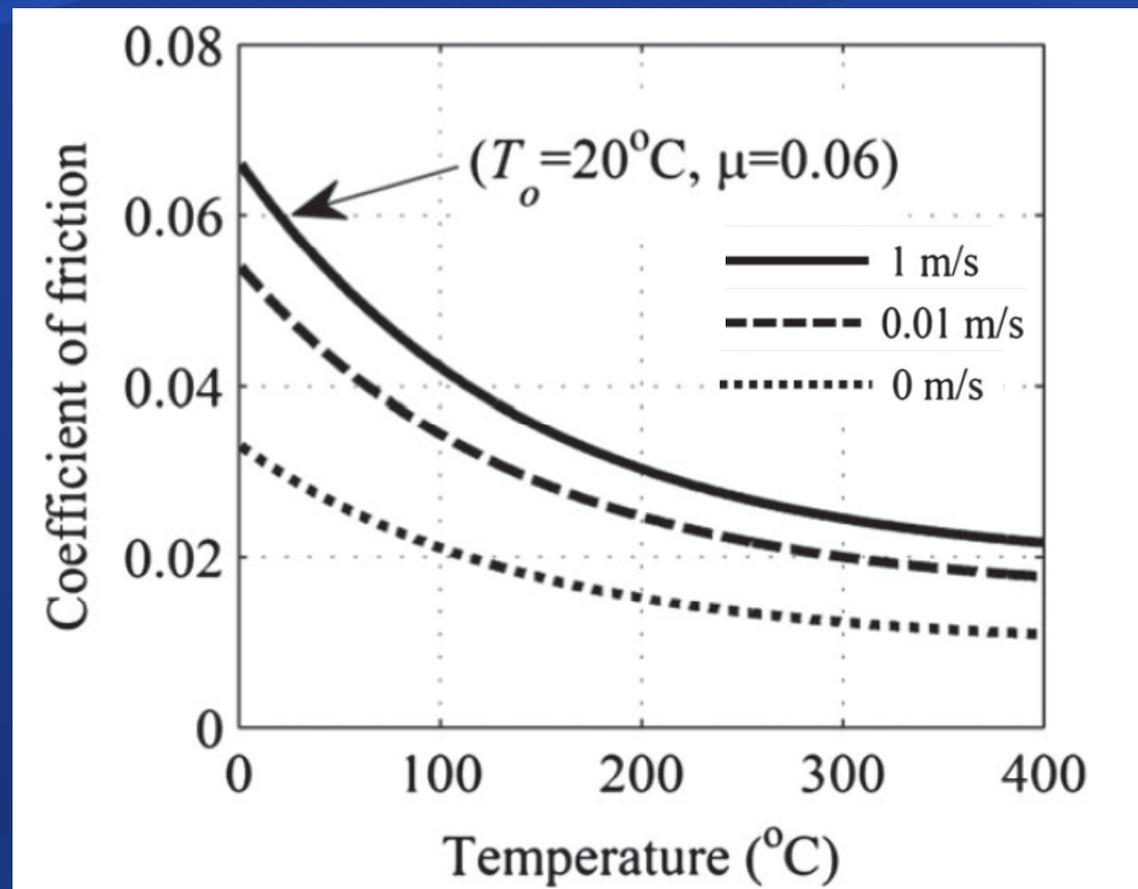
- Cresce al crescere della velocità; oltre una certa soglia di velocità si attesta ad un valore costante



# Isolatori a pendolo scorrevole

## Effetti della temperatura sul coefficiente di attrito (Cycling effect)

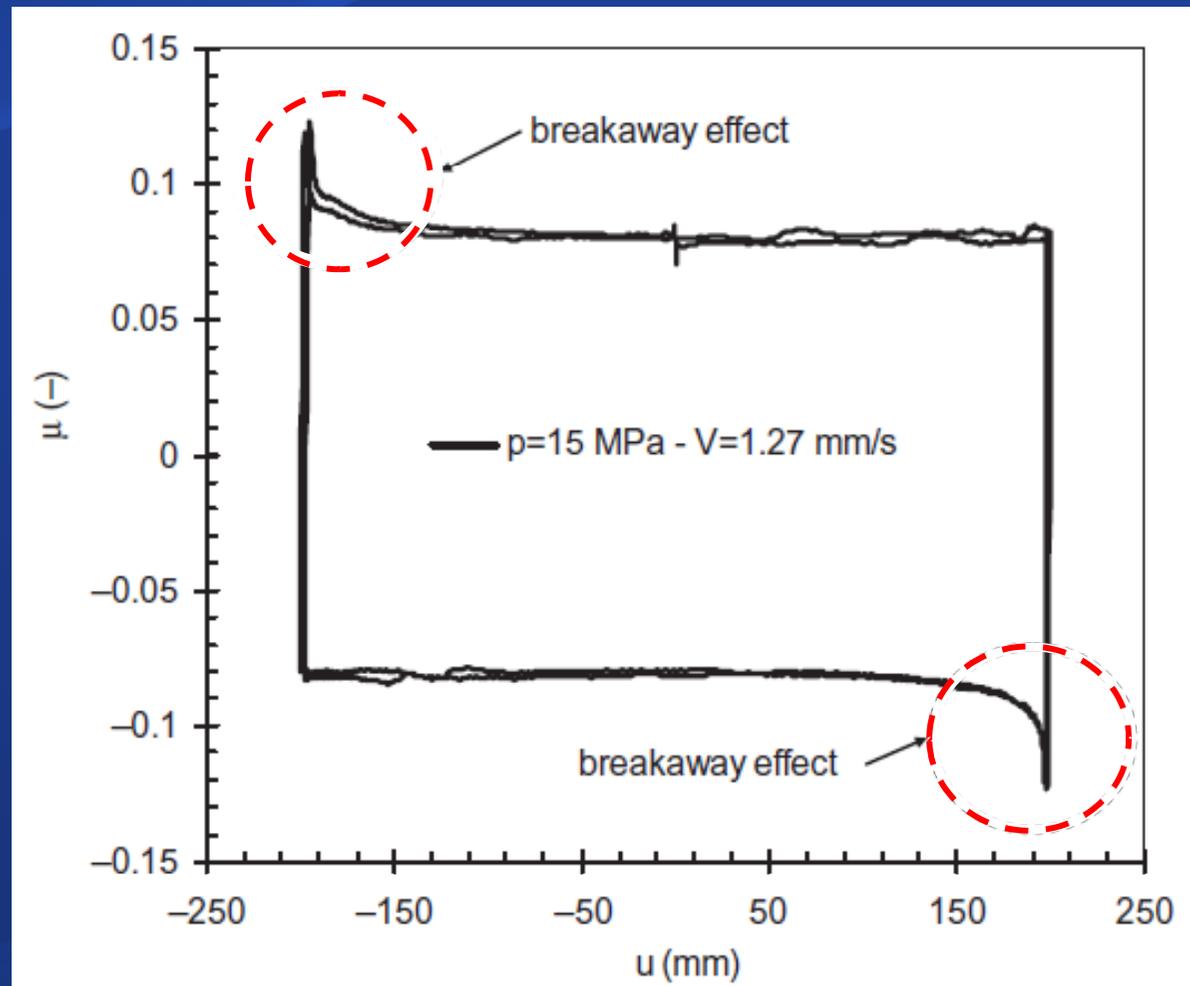
- Diminuisce all'aumentare della temperatura, per effetto del riscaldamento del materiale a basso attrito, che aumenta al crescere del numero di cicli. Questo effetto è più evidente a più alte velocità



# Isolatori a pendolo scorrevole

Effetti dovuti all'inversione del moto in una prova monodirezionale  
(**Breakaway effect**)

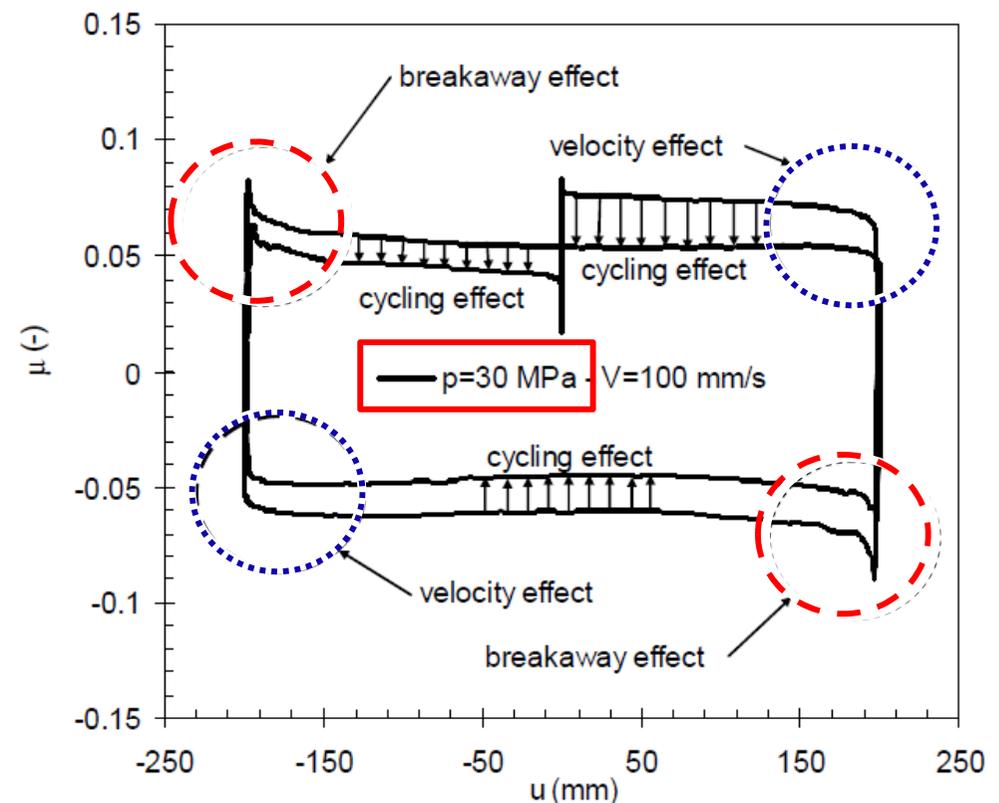
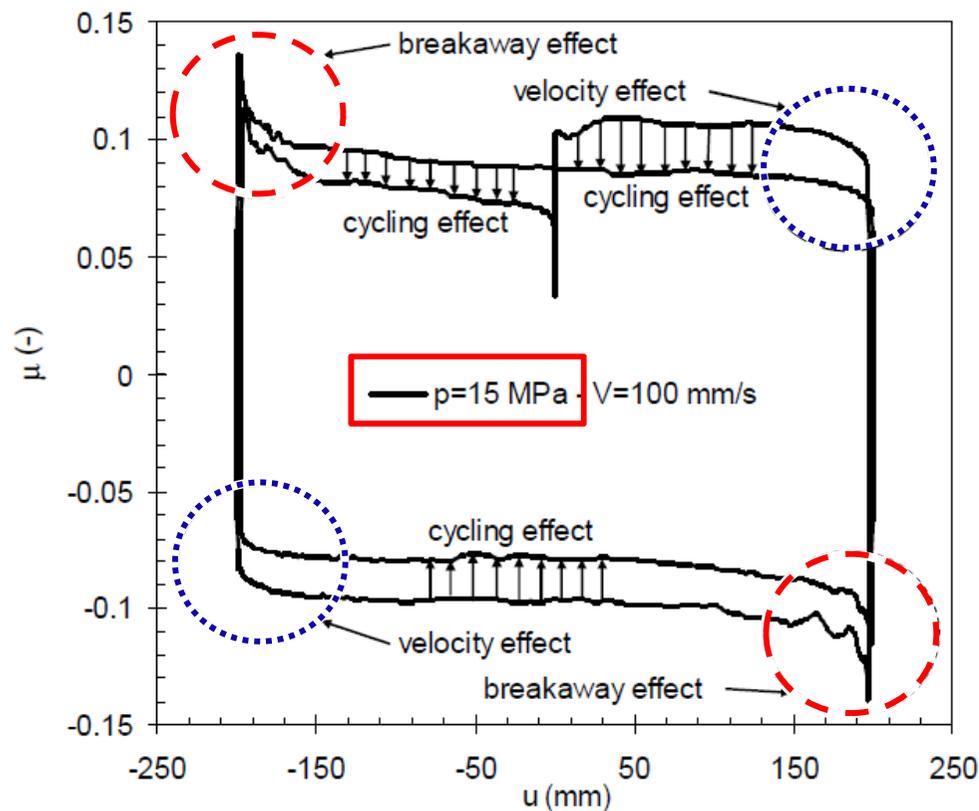
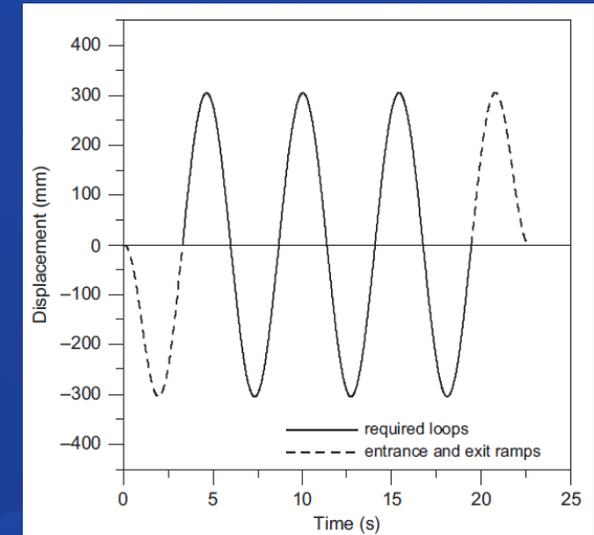
- A velocità nulla (inversione del moto) si passa dal coefficiente di attrito dinamico a quello statico (maggiore)



# Isolatori a superficie piana (slitte)

## Effetti combinati

- Pressure effect
- Velocity effect
- Cycling effect
- Breakaway effect



# Isolatori a pendolo scorrevole

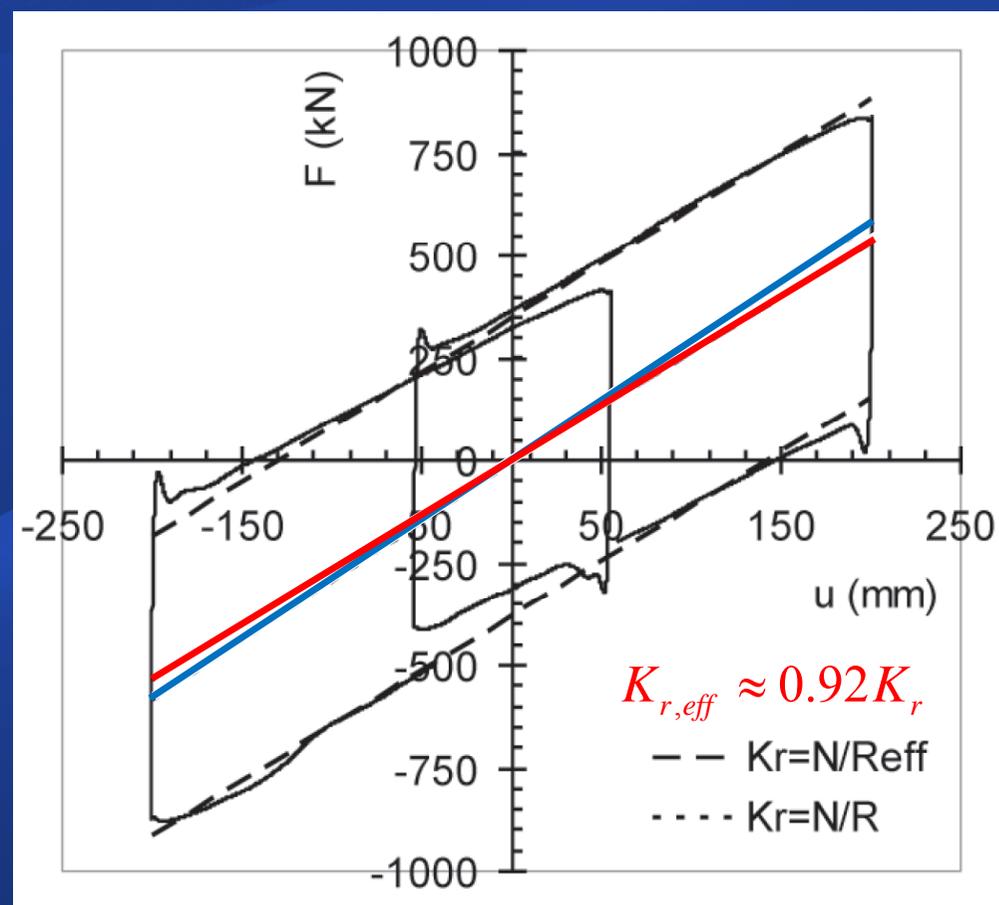
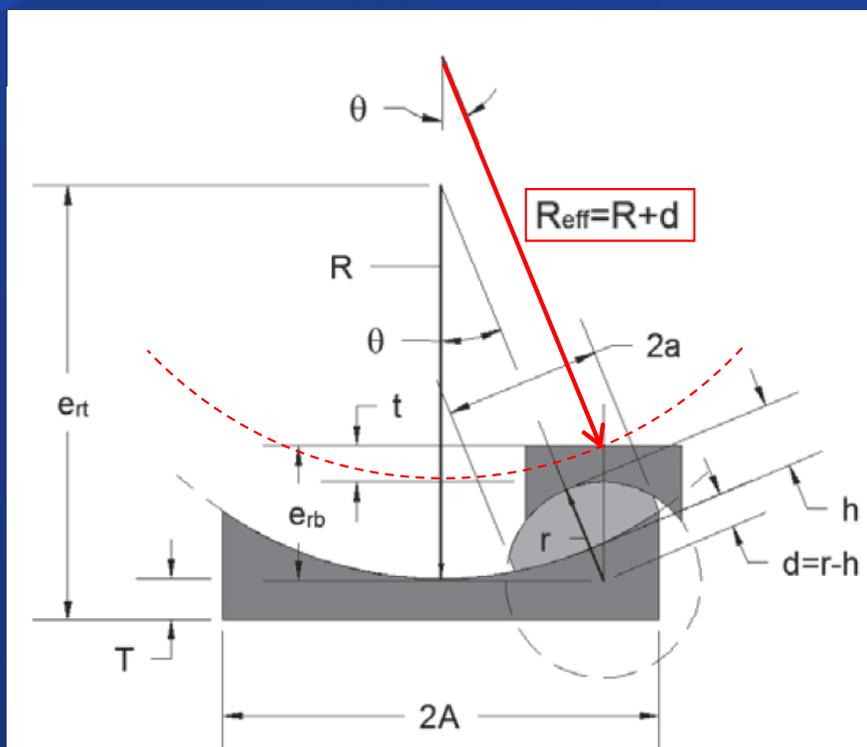
## Rigidezza effettiva

- Il raggio effettivo riduce la rigidezza e, quindi, la forza di richiamo del dispositivo – Effetti geometrici

$$R_{eff} = R + d > R \quad R_{eff} \approx 1.08 \div 1.10R$$

$$K_{r,eff} \approx \frac{N}{R+d} < K_r \quad K_{r,eff} \approx 0.91 \div 0.93K_r$$

Geometric dimension	length (mm)
A	435
a	180
R	2235
r	375
T	40
t	120
h	160
$d = r - h$	215



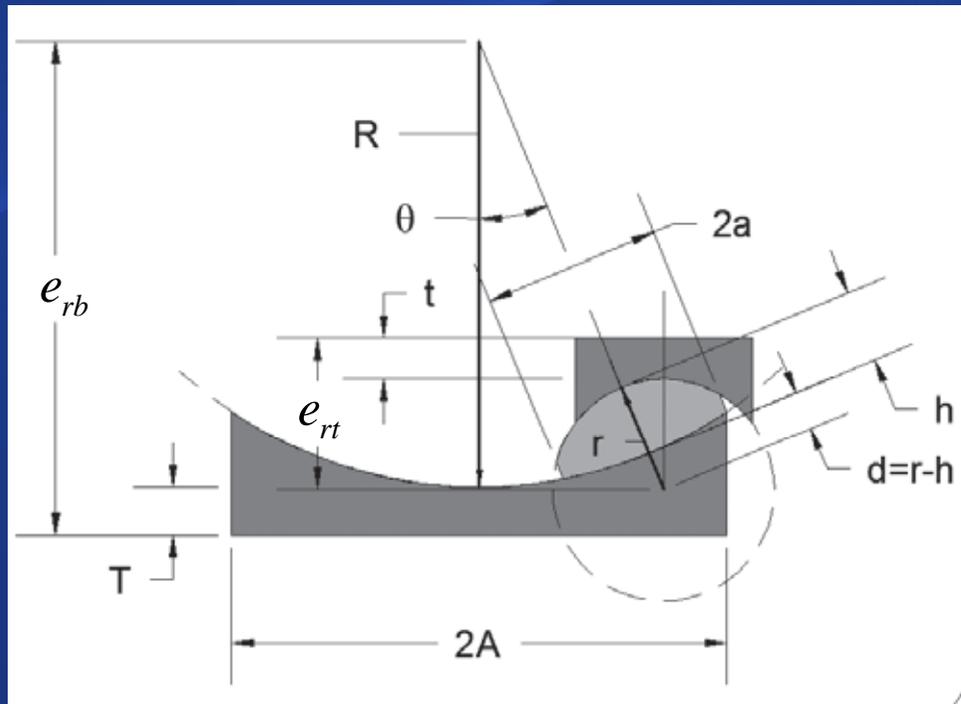
# Isolatori a pendolo scorrevole

## Momenti flettenti dovuti al moto

- Momenti flettenti che devono essere tenuti in conto nella progettazione

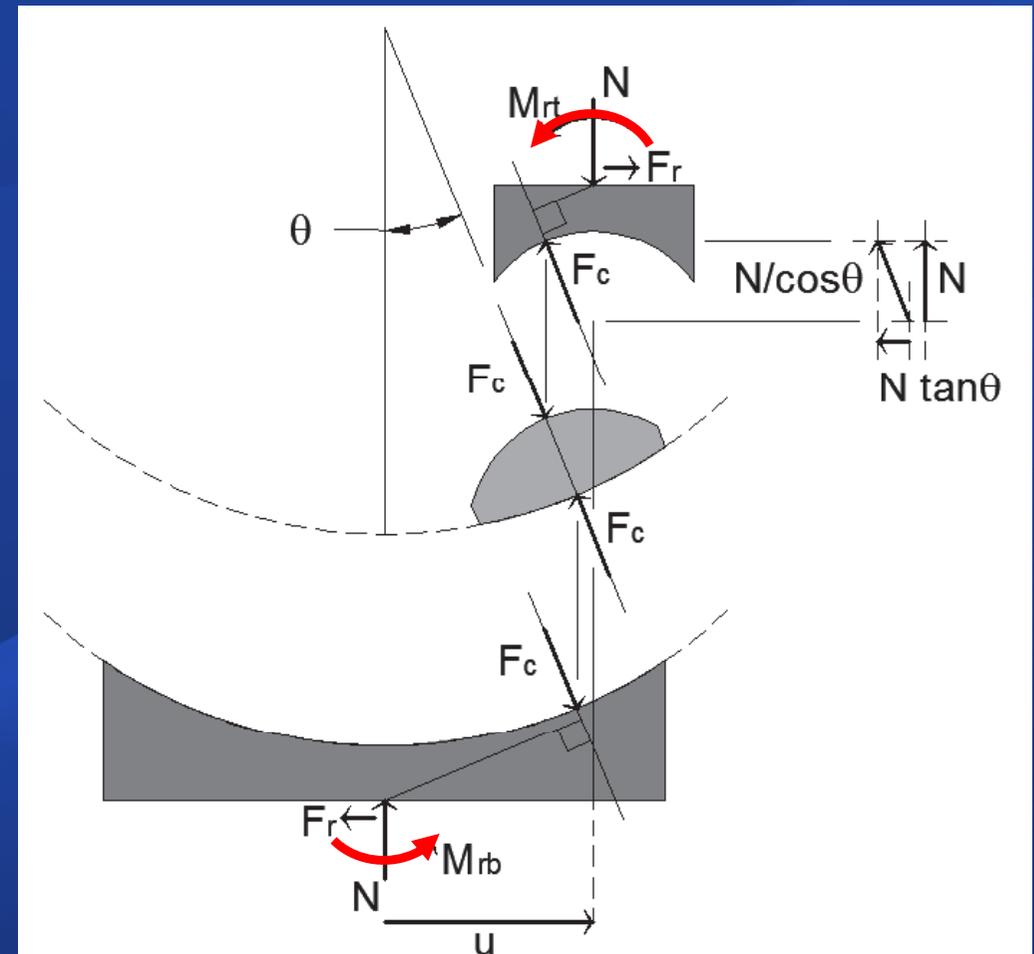
$$M_{rt} = F_r \cdot e_{rt} = F_r \cdot (r + t)$$

$$M_{rb} = F_r \cdot e_{rb} = F_r \cdot (R + T)$$



$$M_{rt} = 180 \text{ kNm}$$

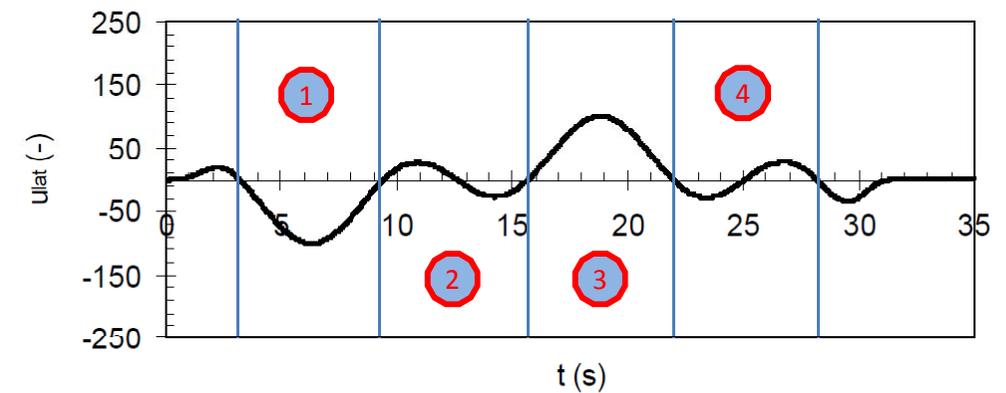
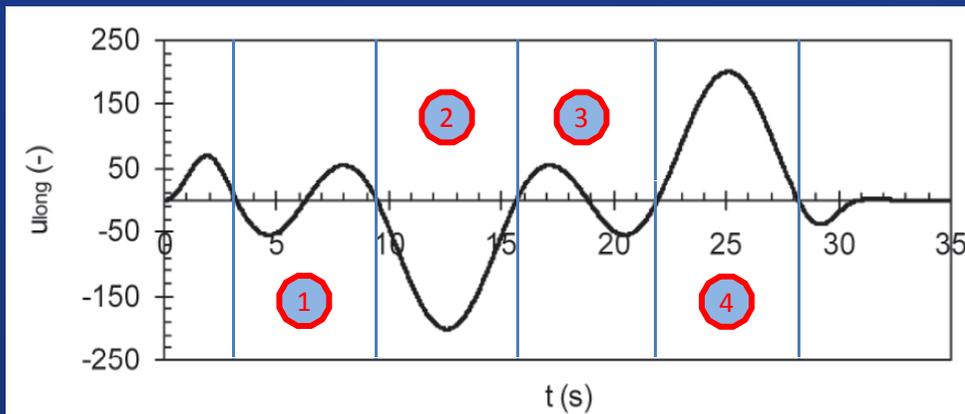
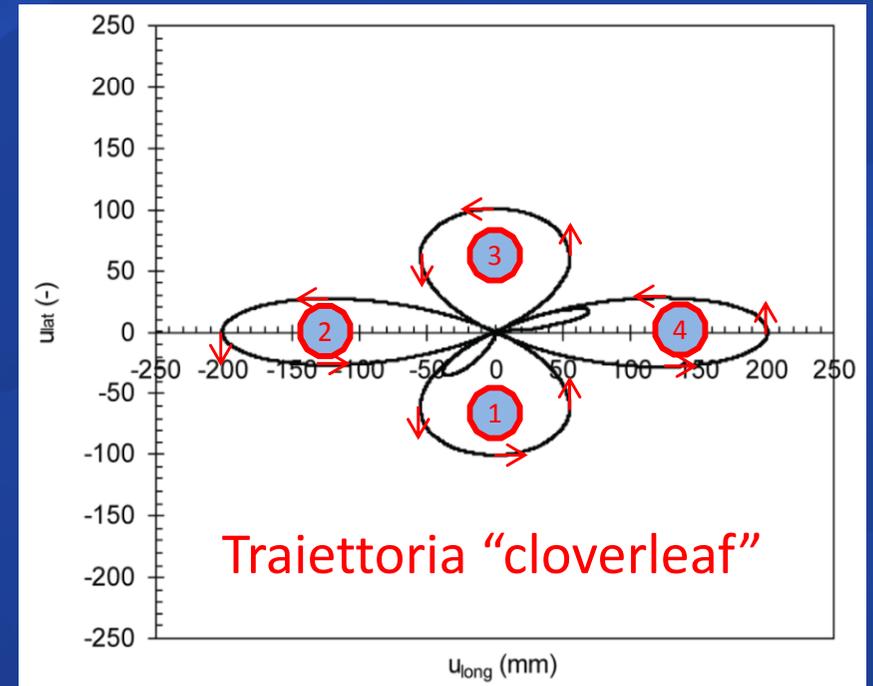
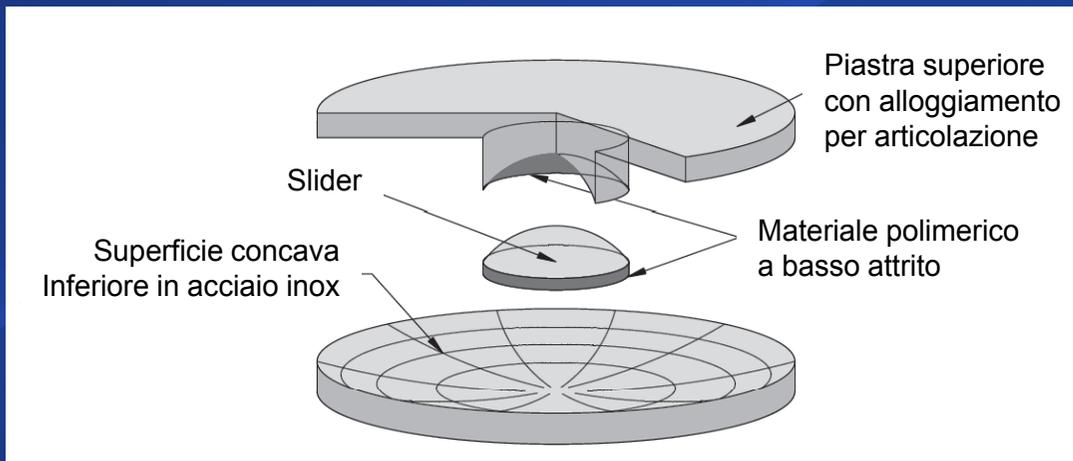
$$M_{rb} = 1192 \text{ kNm}$$



# Isolatori a pendolo scorrevole

Effetti dovuti alla bi-direzionalità del moto

- Single FP



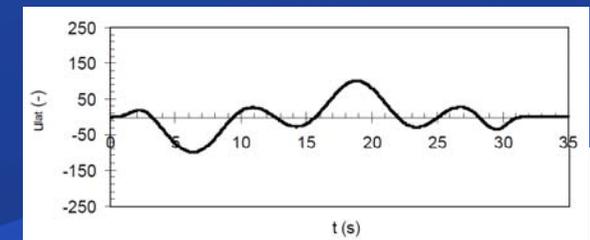
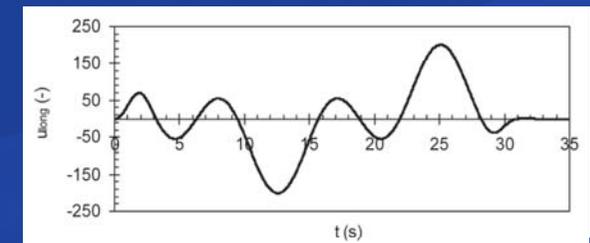
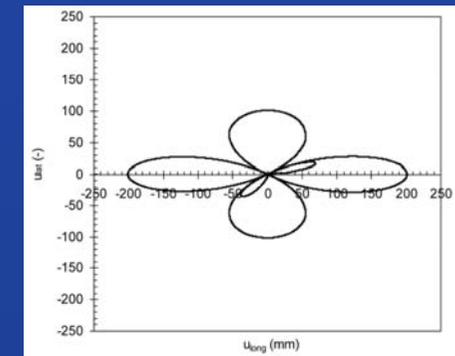
# Isolatori a pendolo scorrevole

Effetti dovuti alla bi-direzionalità del moto

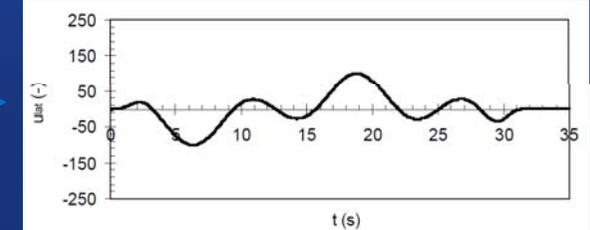
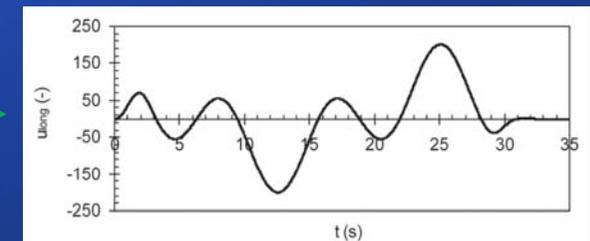
- Confronto tra il comportamento mono-direzionale e bi-direzionale

Test #	Test type	Vertical load $N$ (kN)	Contact pressure $p_c$ (MPa)	Peak Long. Displ. $D_{long}$ (mm)	Peak Long. Vel. $V_{long}$ (mm/s)	Peak Lat. Displ. $D_{lat}$ (mm)	Peak Lat. Vel. $V_{lat}$ (mm/s)
01	CL	3263	15	200	90	100	45
02	CL	6525	30	200	90	100	45
03	CL	13050	60	200	90	100	45
04	CL long. comp.	6525	30	200	90	-	-
05	CL lat. comp.	6525	30	-	-	100	45

## Bi-direzionale



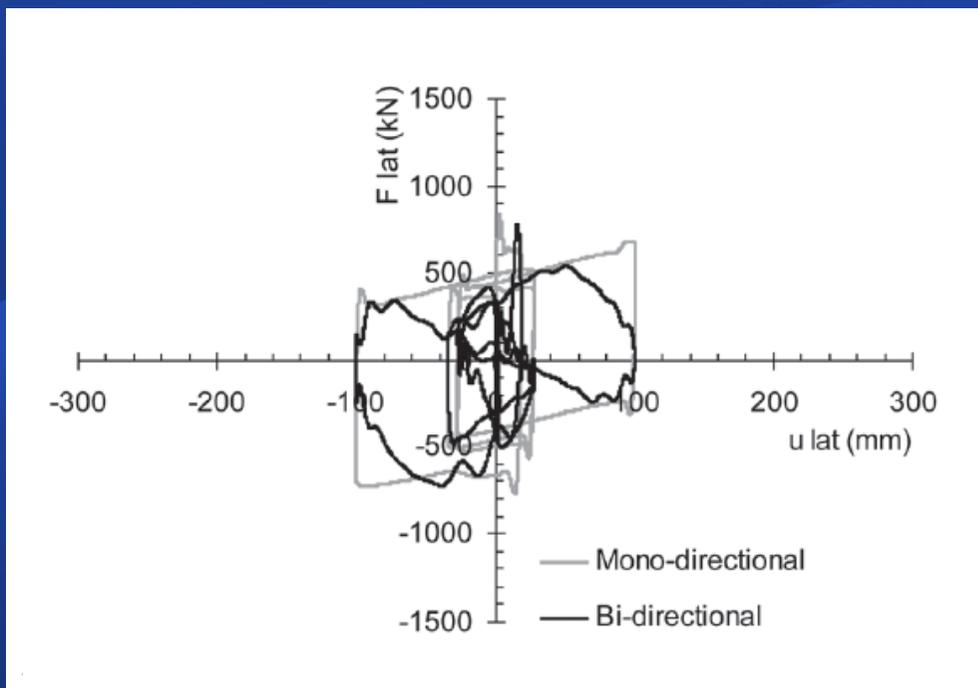
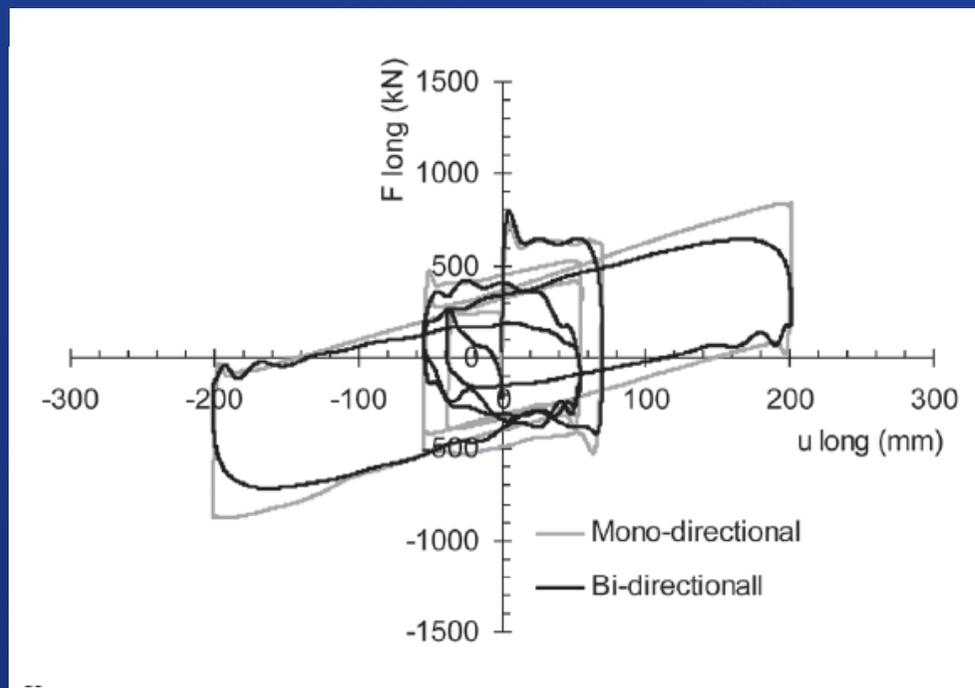
## Mono-direzionali



# Isolatori a pendolo scorrevole

## Effetti dovuti alla bi-direzionalità del moto

- Si nota uno notevole riduzione dell'area del ciclo di isteresi, dovuta in parte alla riduzione del coeff. di attrito per effetti termici (ciclici), in parte associata agli effetti dovuti al moto bi-direzionale
- L'energia dissipata in un ciclo si riduce del **23%** nella direzione longitudinale e del **41%** in quella trasversale

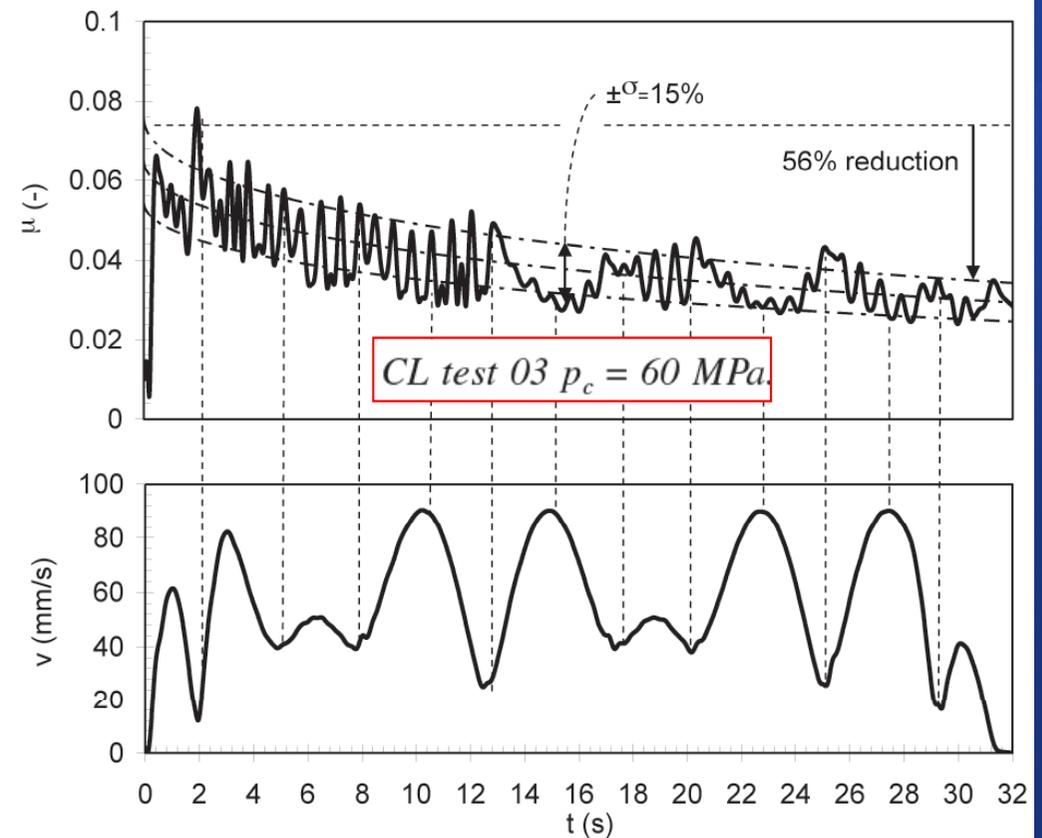
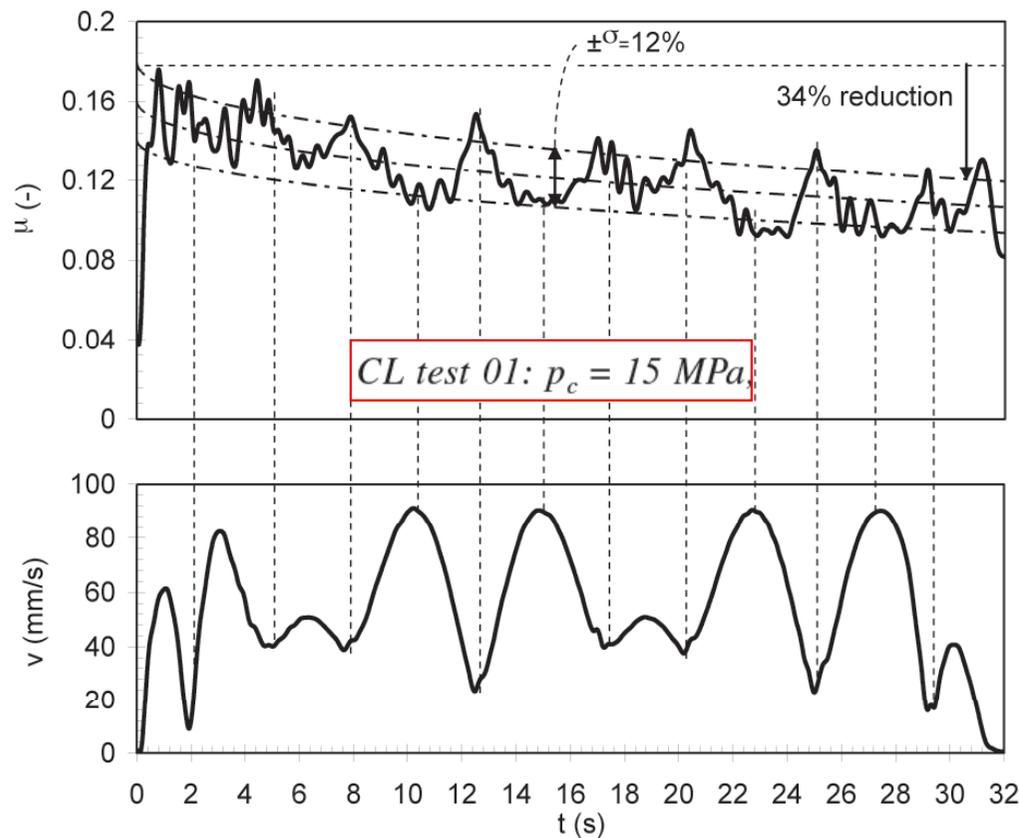


# Isolatori a pendolo scorrevole

Effetti dovuti alla bi-direzionalità del moto

- Andamento nel tempo del coefficiente di attrito / velocità
- Effetti combinati velocità/temperatura

Test #	Test type	Vertical load $N$ (kN)	Contact pressure $p_c$ (MPa)	Peak Long. Displ. $D_{long}$ (mm)	Peak Long. Vel. $V_{long}$ (mm/s)	Peak Lat. Displ. $D_{lat}$ (mm)	Peak Lat. Vel. $V_{lat}$ (mm/s)
01	CL	3263	15	200	90	100	45
02	CL	6525	30	200	90	100	45
03	CL	13050	60	200	90	100	45
04	CL long. comp.	6525	30	200	90	–	–
05	CL lat. comp.	6525	30	–	–	100	45

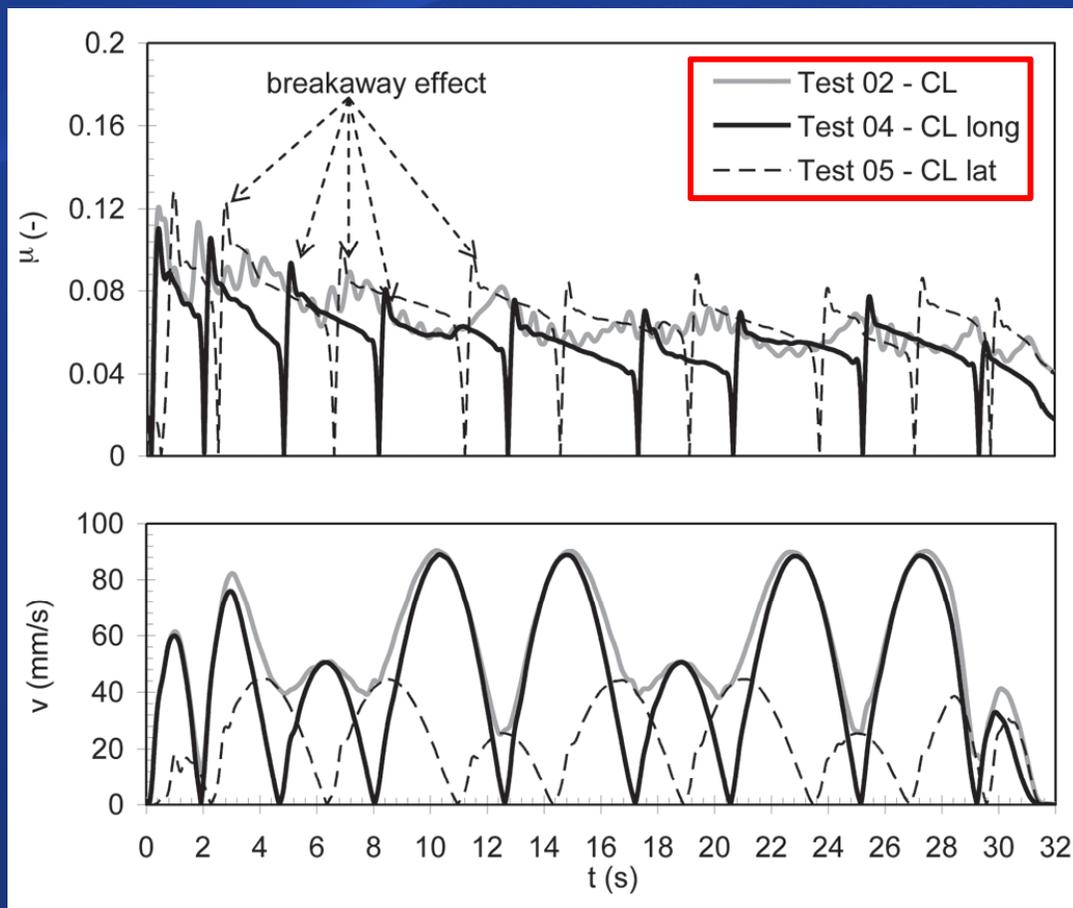


# Isolatori a pendolo scorrevole

## Effetti dovuti alla bi-direzionalità del moto

- Andamento nel tempo del coefficiente di attrito / velocità

Test #	Test type	Vertical load $N$ (kN)	Contact pressure $p_c$ (MPa)	Peak Long. Displ. $D_{long}$ (mm)	Peak Long. Vel. $V_{long}$ (mm/s)	Peak Lat. Displ. $D_{lat}$ (mm)	Peak Lat. Vel. $V_{lat}$ (mm/s)
01	CL	3263	15	200	90	100	45
02	CL	6525	30	200	90	100	45
03	CL	13050	60	200	90	100	45
04	CL long. comp.	6525	30	200	90	–	–
05	CL lat. comp.	6525	30	–	–	100	45

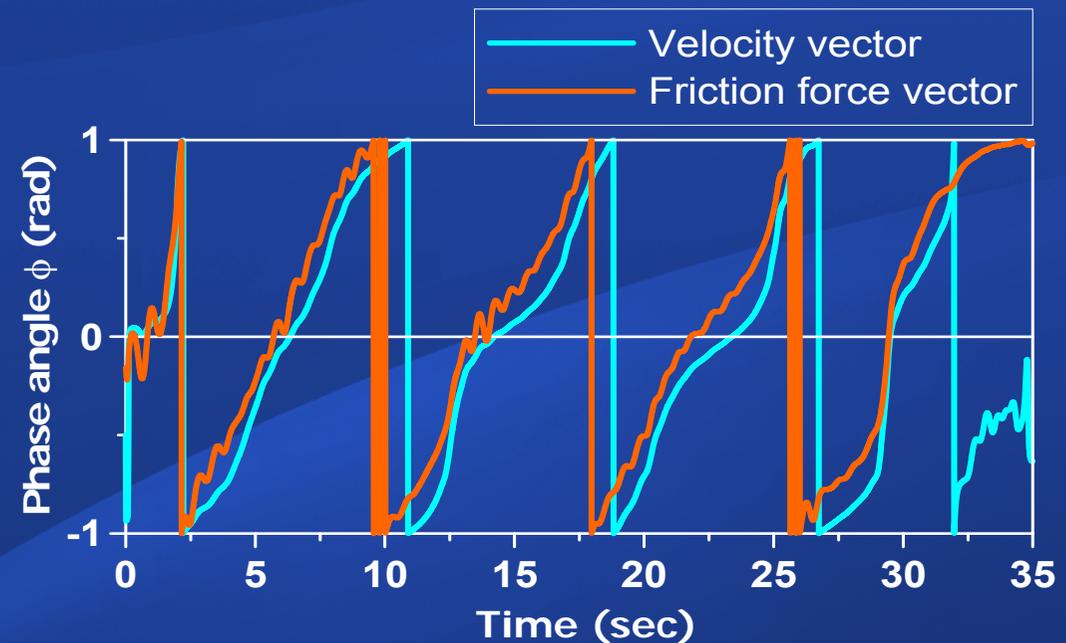
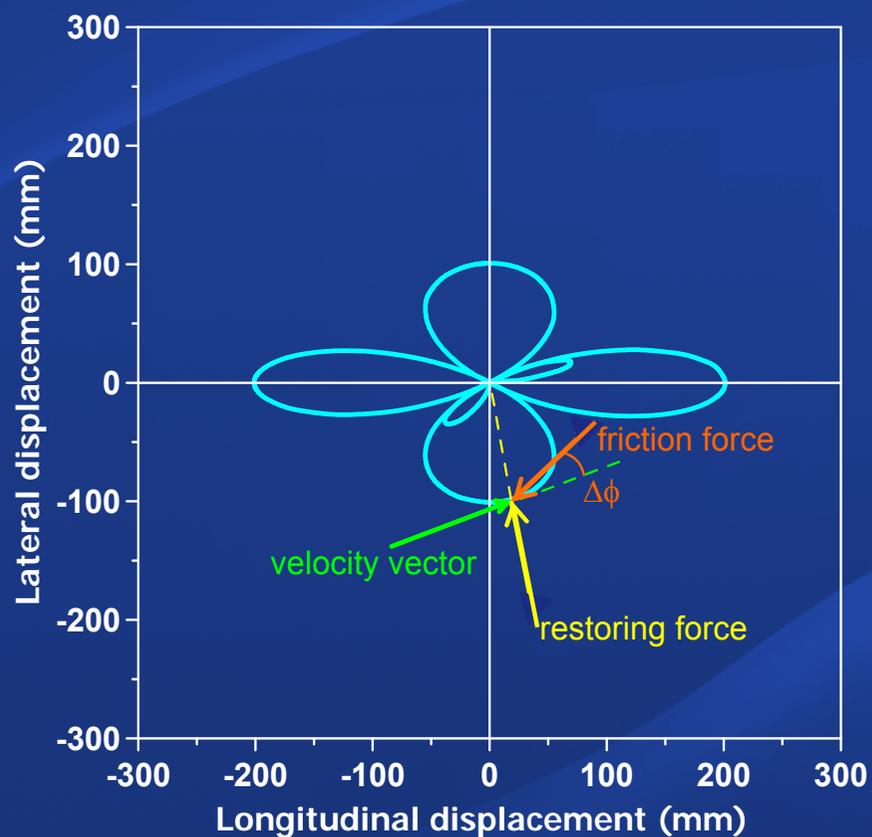


- L'effetto breakaway appare più pronunciato in test monodirezionali dove l'inversione del moto è più frequente

# Isolatori a pendolo scorrevole

## Effetti dovuti alla bi-direzionalità del moto

- Dalle prove sperimentali, si è rilevato che l'angolo della risultante delle forze di attrito non risulta parallelo a quello del vettore velocità (tangente alla traiettoria). Qual è il meccanismo che determina questo fenomeno?

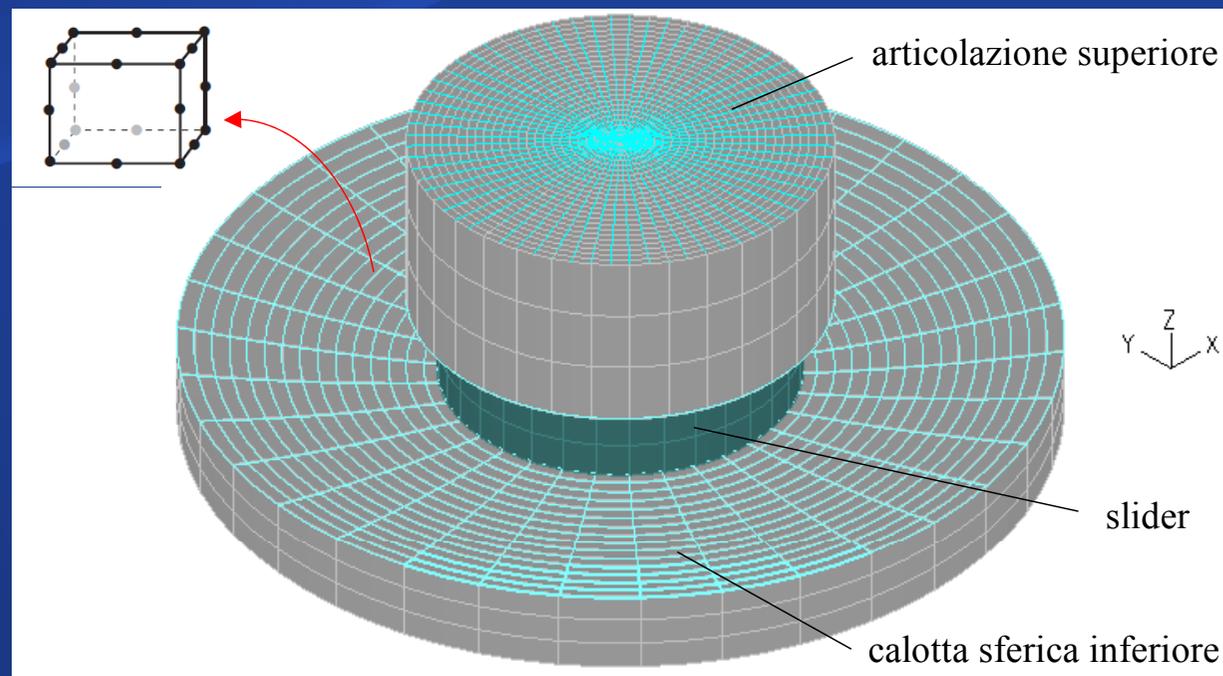


- Lo sfasamento angolare  $e' \sim$  costante durante il test "clover leaf" e pari a circa  $\Delta\phi \approx 14^\circ$

# Isolatori a pendolo scorrevole

## Modelli numerici

- Sono state elaborate una serie di analisi modellando l'isolatore agli EF e indagando sul suo comportamento mono- e bi-direzionale



ADINA

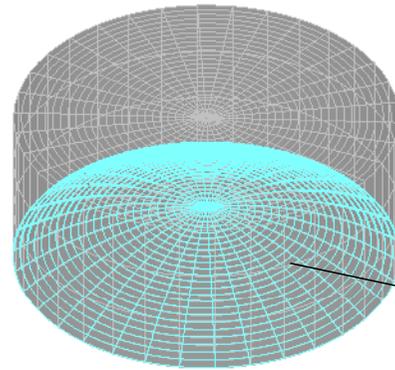
AUTOMATIC  
DYNAMIC  
INCREMENTAL  
NONLINEAR  
ANALYSIS

Dati mesh: 7140 elementi, 35721 nodi (3 DOFs per nodo, ovvero le tre traslazioni rispetto ad un sistema di riferimento cartesiano  $x-y-z$ ).

# Isolatori a pendolo scorrevole

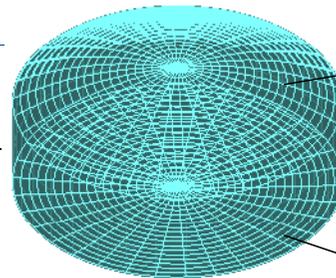
Modelli numerici

Element Group 3 (EG3)



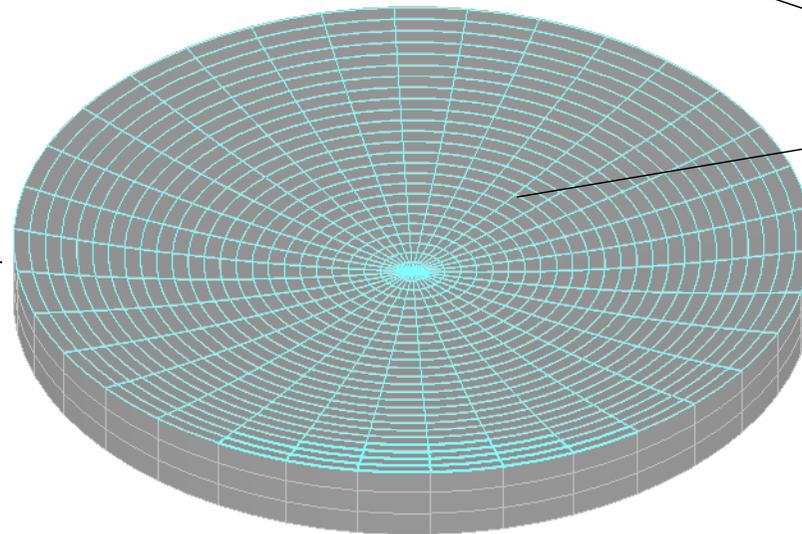
Contact Surface 4 (CS4)

Element Group 2 (EG2)



Contact Surface 3 (CS3)

Element Group 1 (EG1)



Contact Surface 2 (CS2)

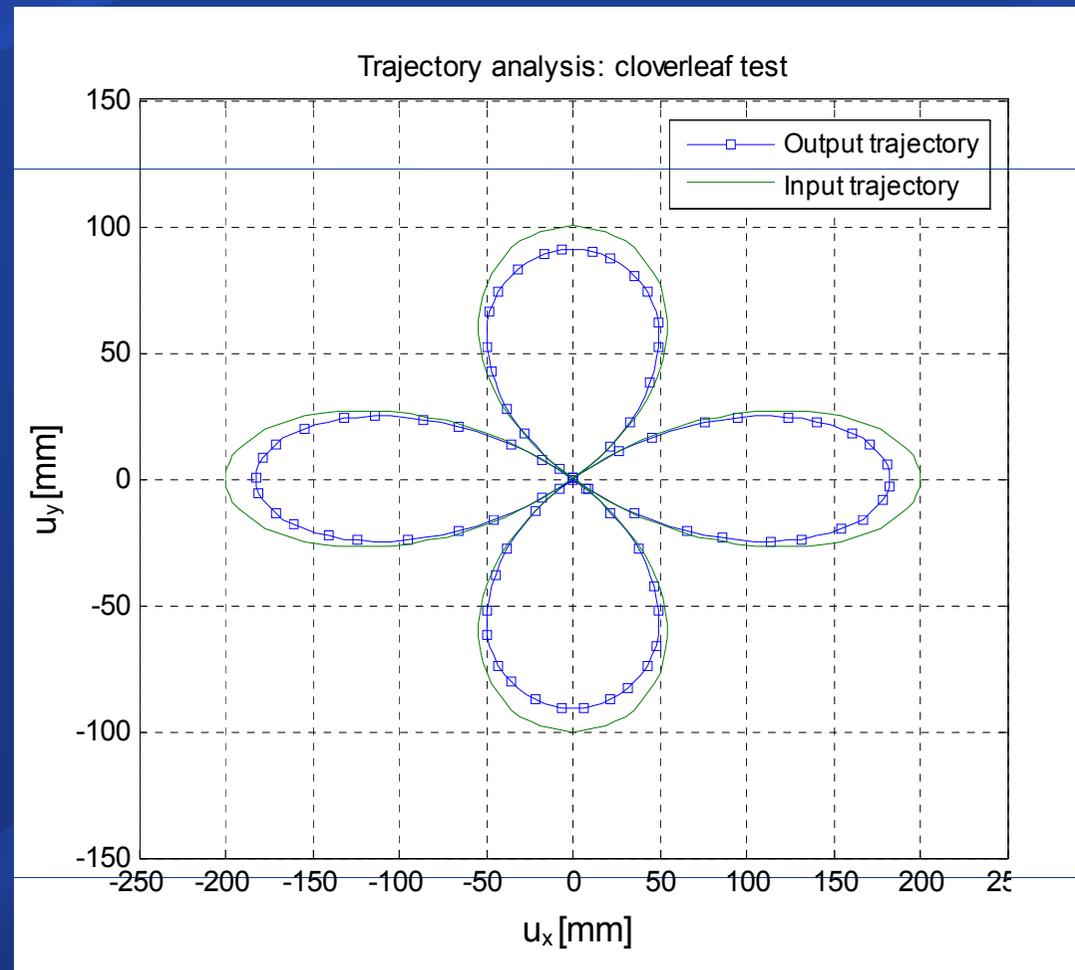
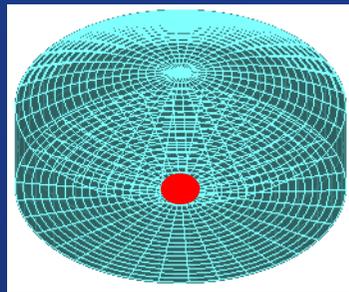
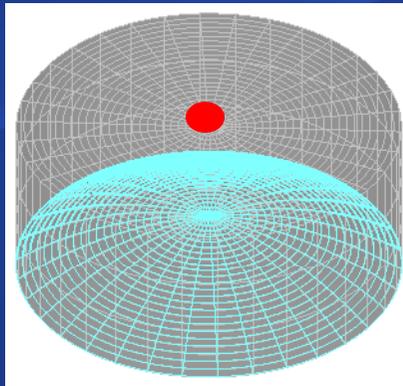
Contact Surface 1 (CS1)

# Isolatori a pendolo scorrevole

Modelli numerici

Traiettoria effettiva del centro della superficie inferiore dello slider

- Per effetto della geometria e della cinematica, si notano riduzioni di circa il 10% rispetto agli spostamenti max imposti ( $\pm 182$  mm contro  $\pm 200$  mm)

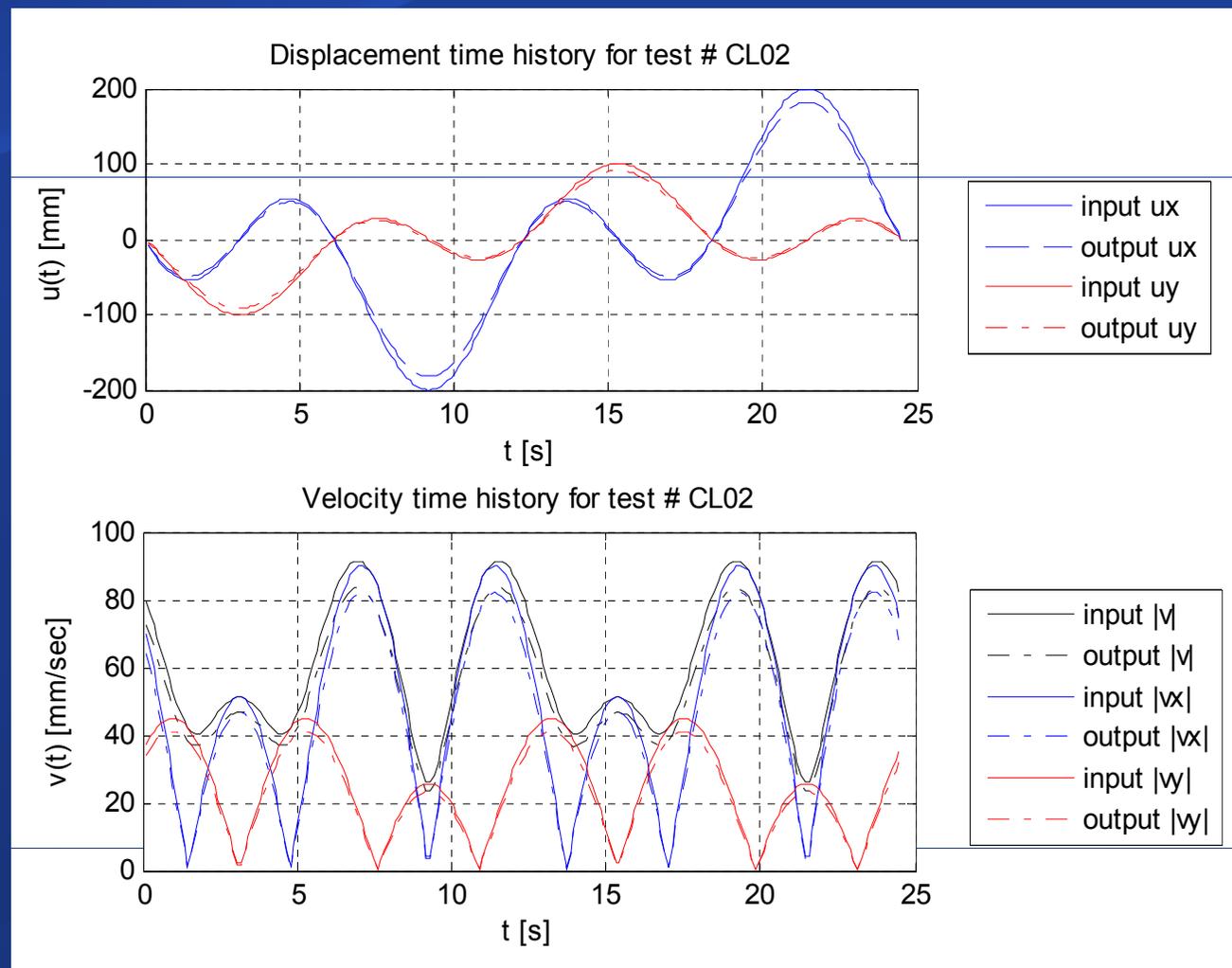


# Isolatori a pendolo scorrevole

## Modelli numerici

## Confronto tra velocità imposta e velocità della superficie inferiore dello slider

- Si notano riduzioni di circa il 10% rispetto alle velocità max imposte (82 mm/s contro 90 mm/s)

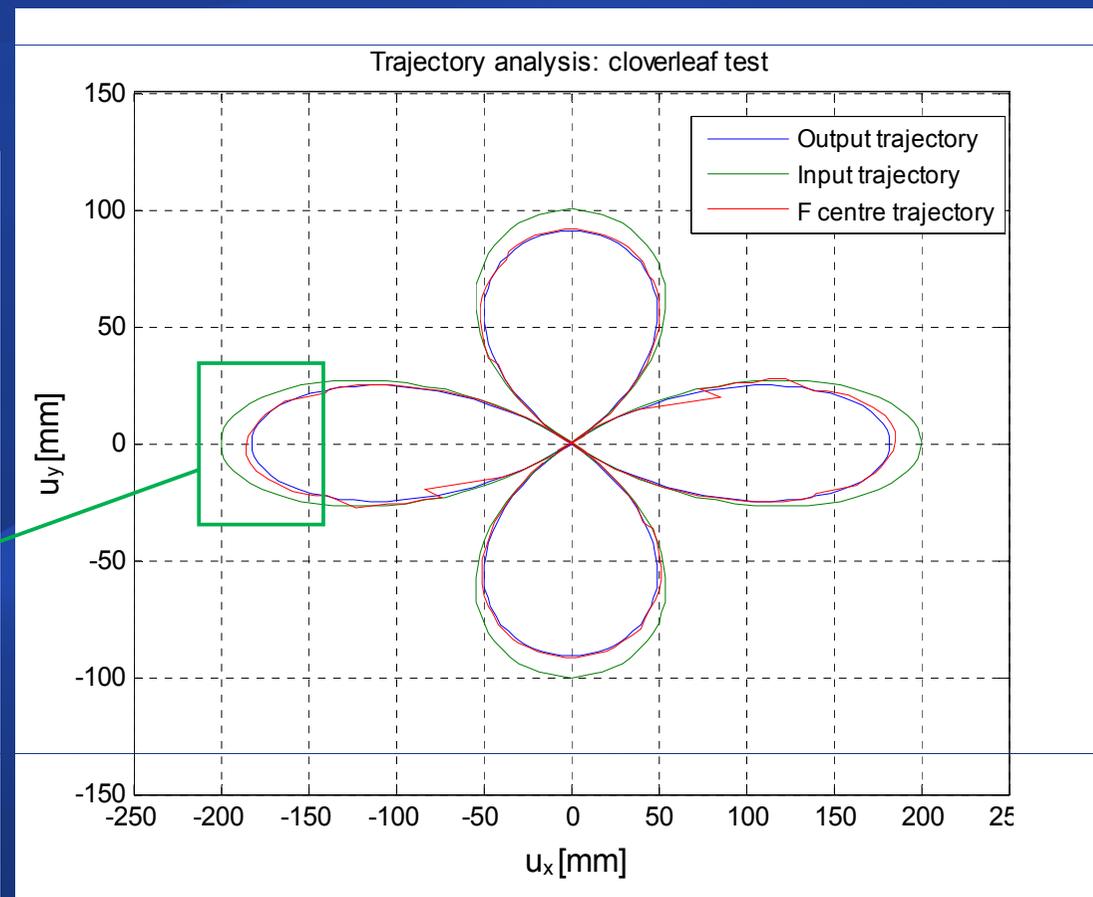
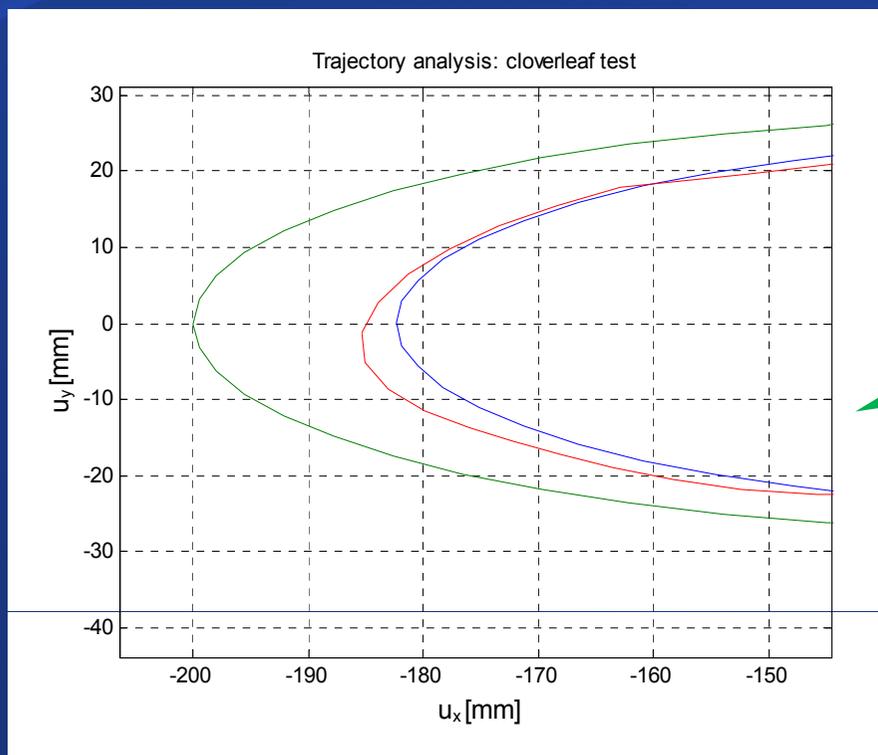


# Isolatori a pendolo scorrevole

## Modelli numerici

### Traiettoria effettiva del centro delle forze di reazione (ricentranti e di attrito)

- La posizione del baricentro delle forze di reazione segue una traiettoria diversa da quella imposta all'isolatore. Sembra tendenzialmente posizionarsi tra la traiettoria imposta in testa e quella seguita effettivamente dallo slider durante il suo movimento

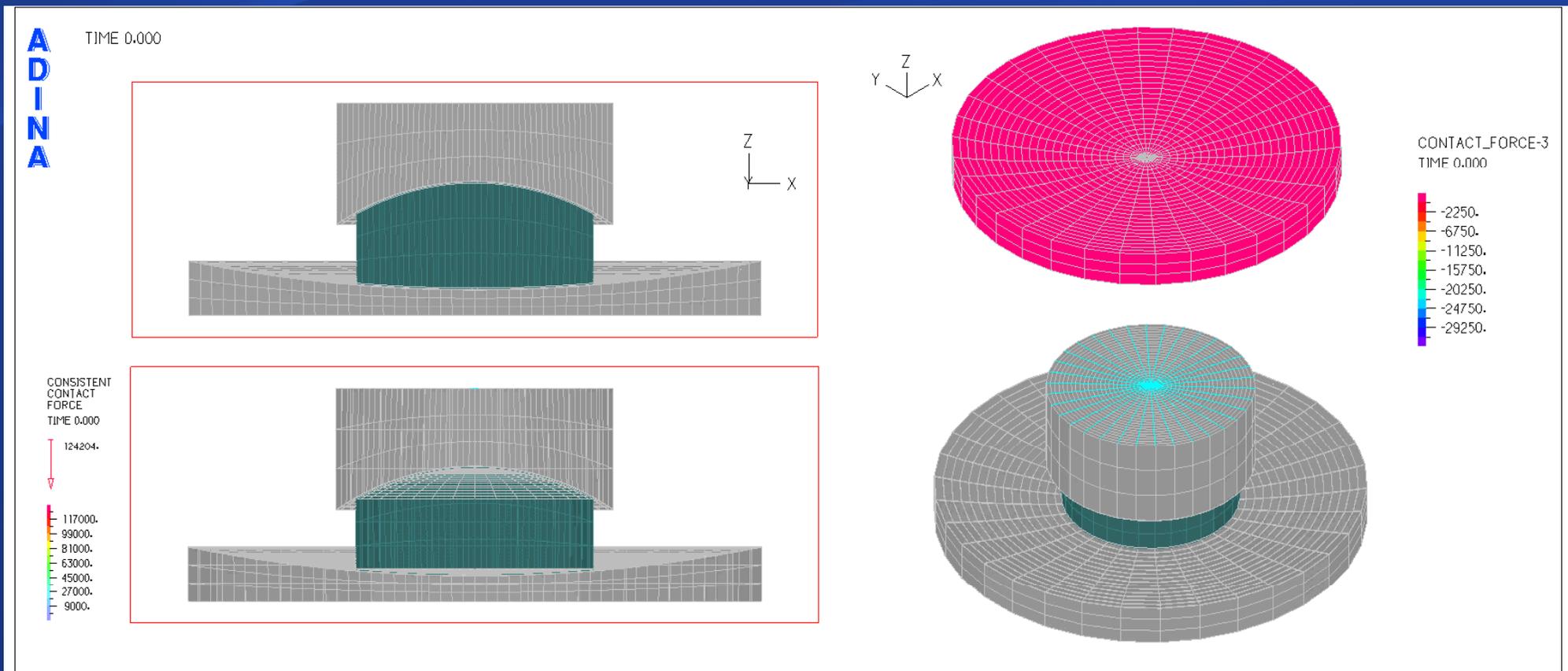


# Isolatori a pendolo scorrevole

## Modelli numerici

## Traiettoria effettiva del centro delle forze di reazione (ricentranti e di attrito)

- Questo fenomeno si osserva anche nel caso monodirezionale. Si osserva anche una distribuzione variabile delle pressioni sulle superfici scorrevoli (superiore e inferiore dello slider)

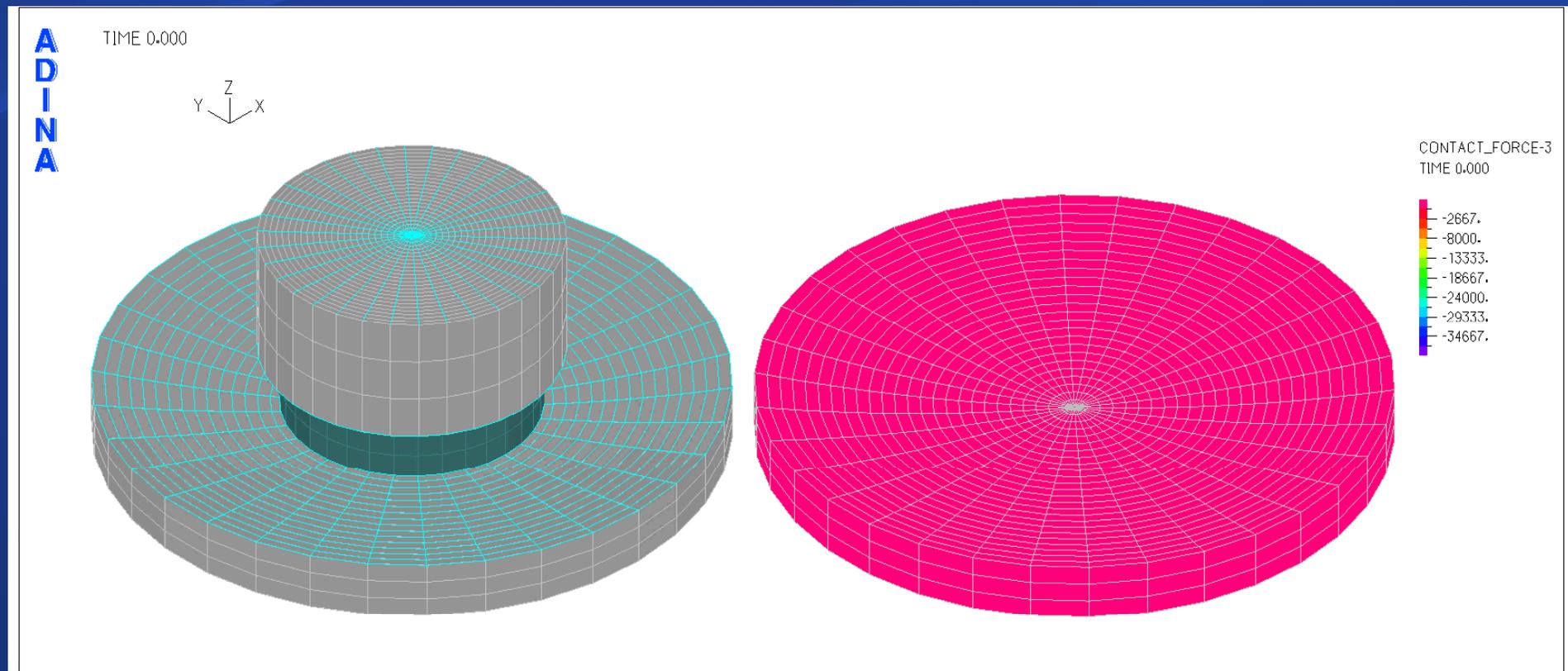


# Isolatori a pendolo scorrevole

Modelli numerici

Traiettoria effettiva del centro delle forze di reazione (ricentranti e di attrito)

- La distribuzione delle pressioni appare ancora più irregolare nel caso bi-direzionale

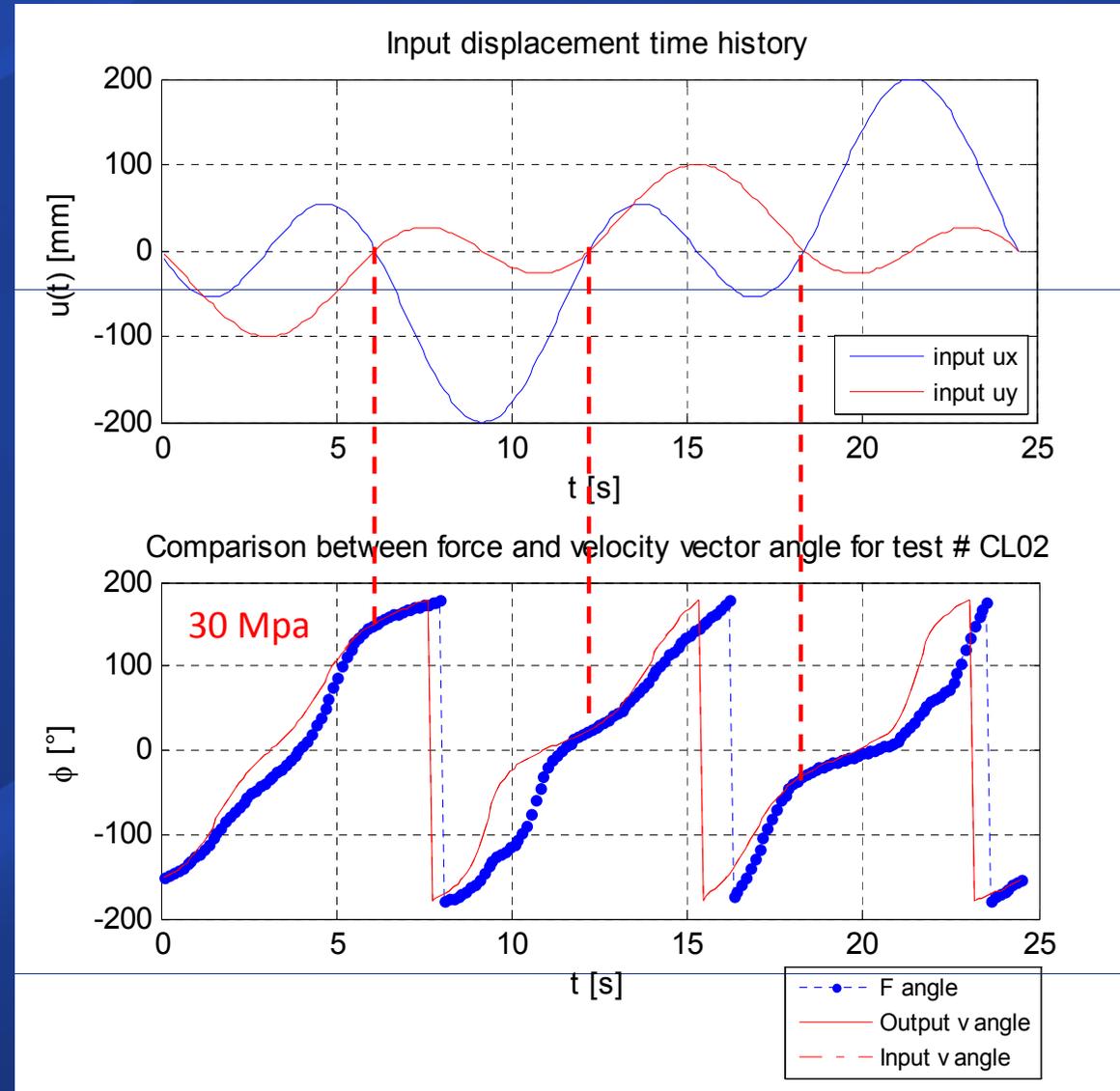
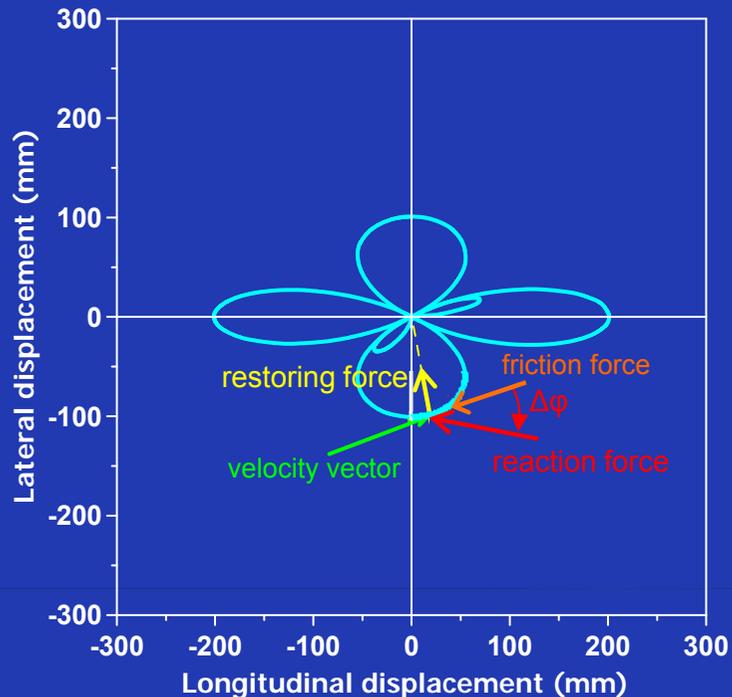


# Isolatori a pendolo scorrevole

## Modelli numerici

Sfasamento tra la direzione del vettore velocità e del vettore delle forze di reazione (ricentranti e di attrito)

- Si osserva inoltre uno sfasamento tra il vettore della velocità (tangente alla traiettoria) e il vettore della forza di reazione

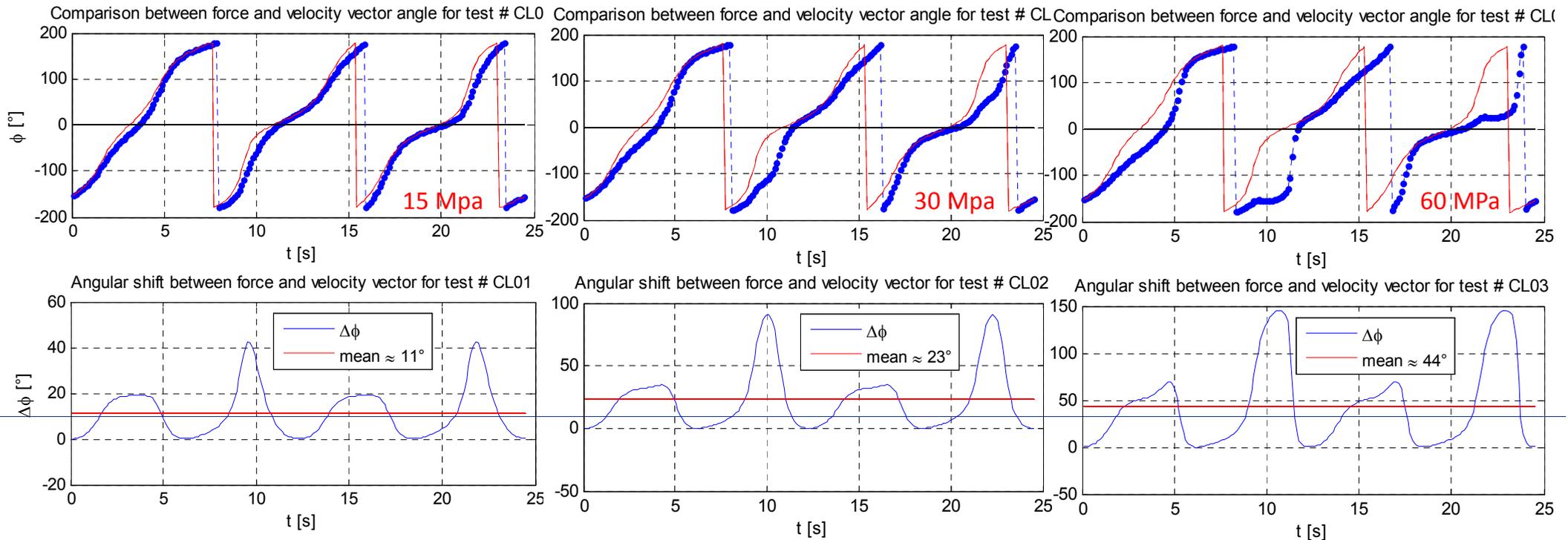
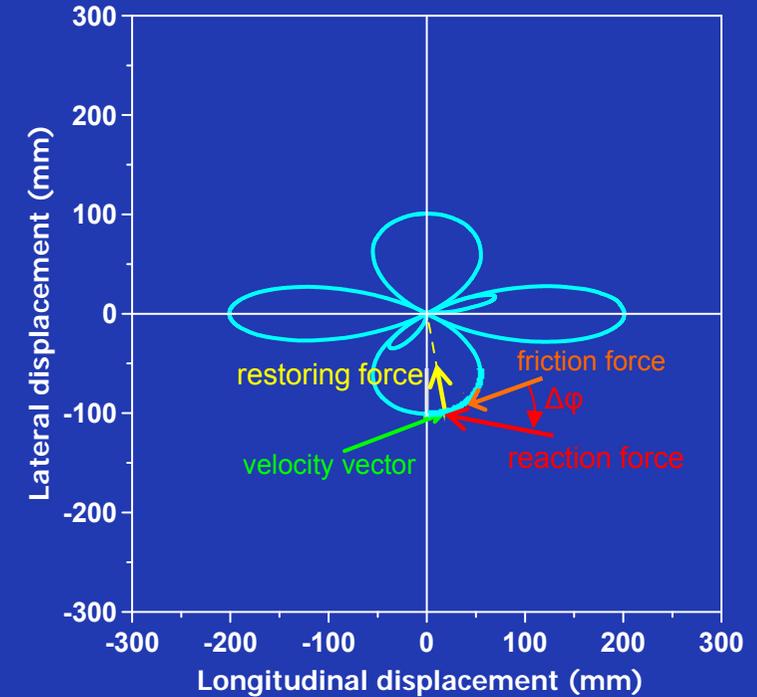
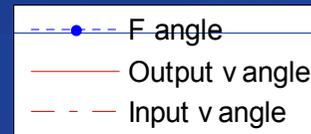


# Isolatori a pendolo scorrevole

Modelli numerici

Sfasamento tra la direzione del vettore velocità e del vettore delle forze di reazione (ricentranti e di attrito)

- Lo sfasamento cresce al crescere della pressione

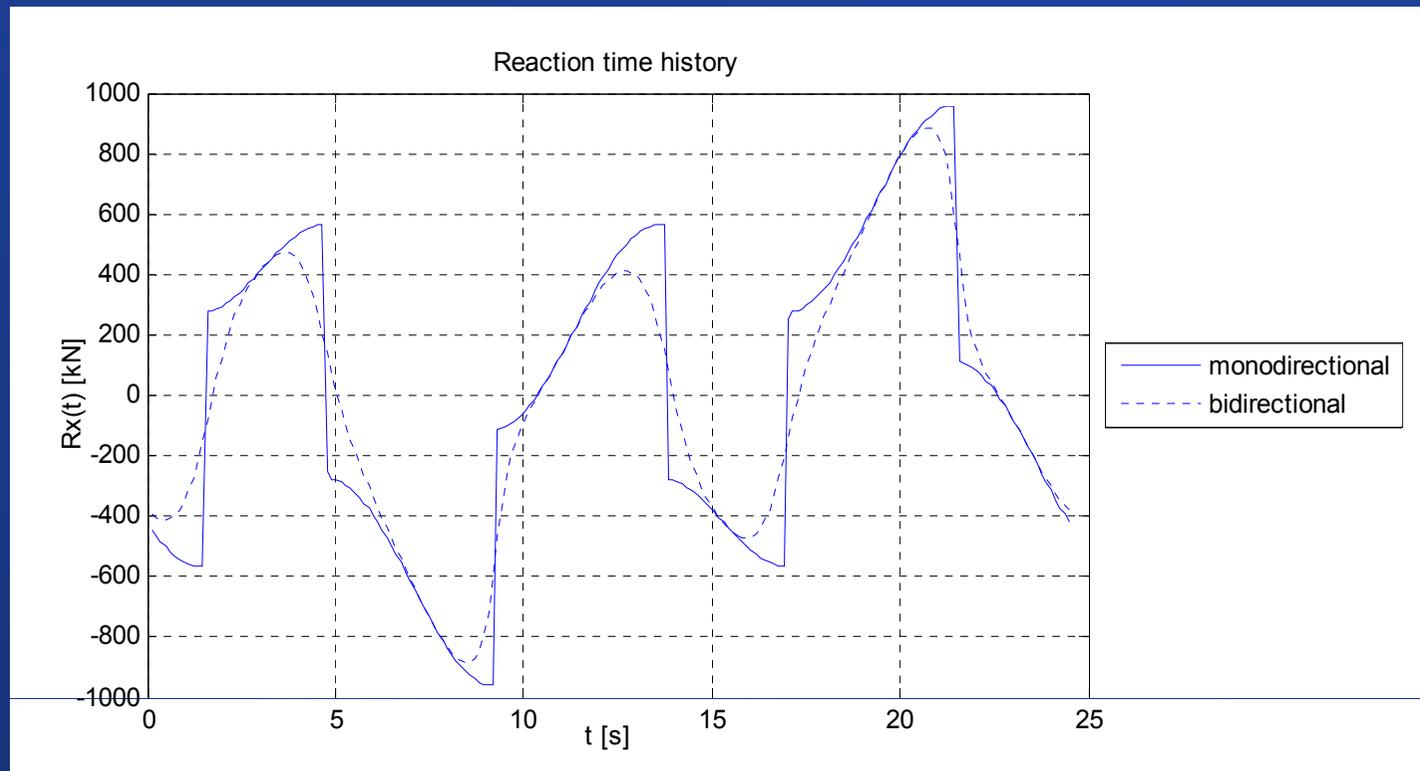


# Isolatori a pendolo scorrevole

## Modelli numerici

### Andamento della forza di reazione (ricentrante e di attrito)

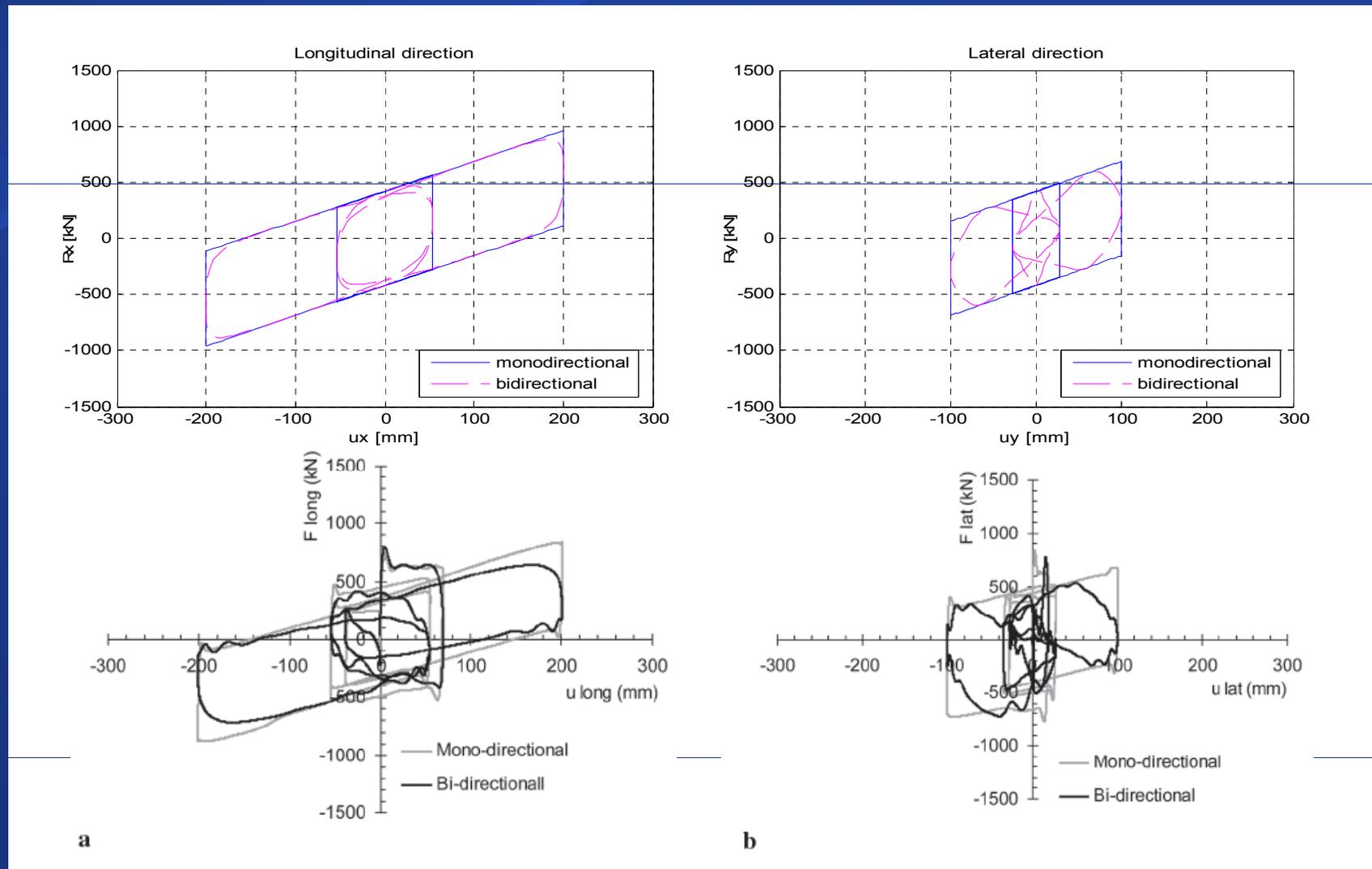
- Nel caso bi-direzionale la componente  $R_x$  varia con legge “smooth”, senza le inversioni di segno dovute all’inversione del moto tipiche del caso monodirezionale e senza raggiungere mai i valori max. Andamento analogo si osserva per  $R_y$



# Isolatori a pendolo scorrevole

## Modelli numerici

Confronto tra i cicli di carico sperimentali e quelli del modello per il test #CL02 (con coeff. di attrito costante) – Test mono e bidirezionali (#CL04 e #CL05)

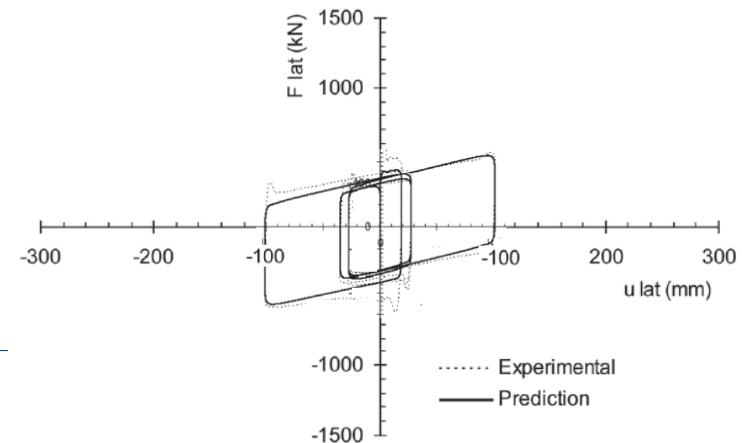
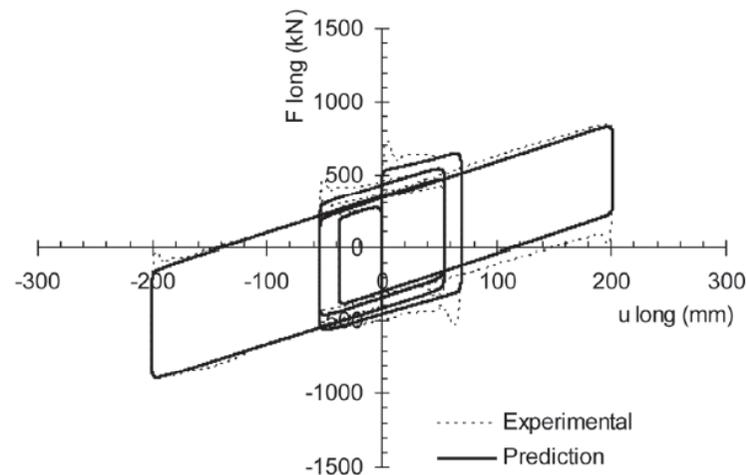
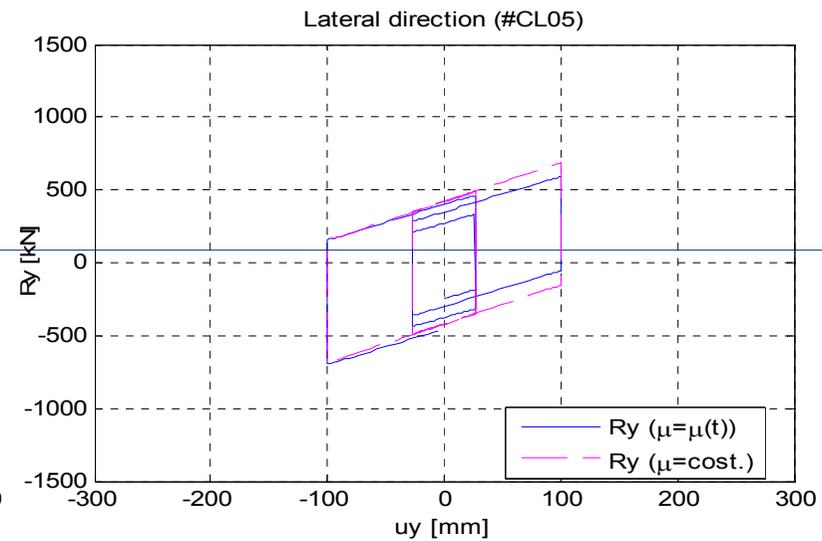
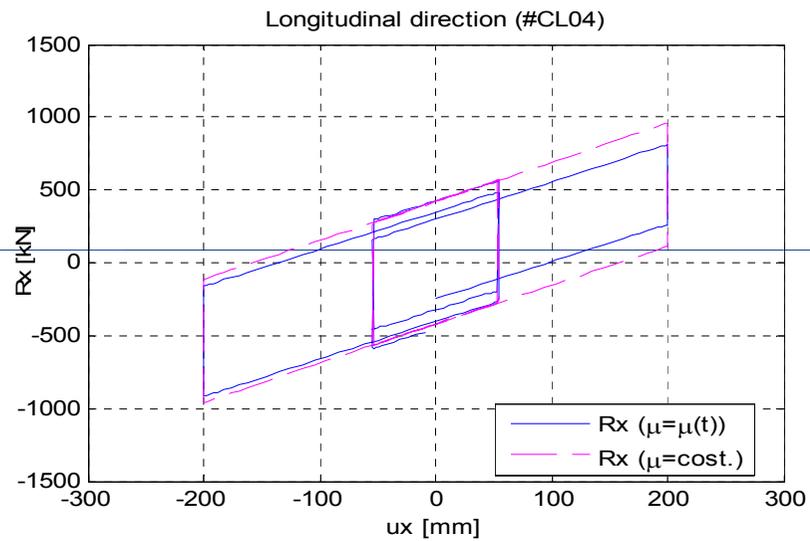


# Isolatori a pendolo scorrevole

Modelli numerici

Effetti ciclici: coeff. di attrito variabile col tempo

Test monodirezionali (#CL04 e #CL05)

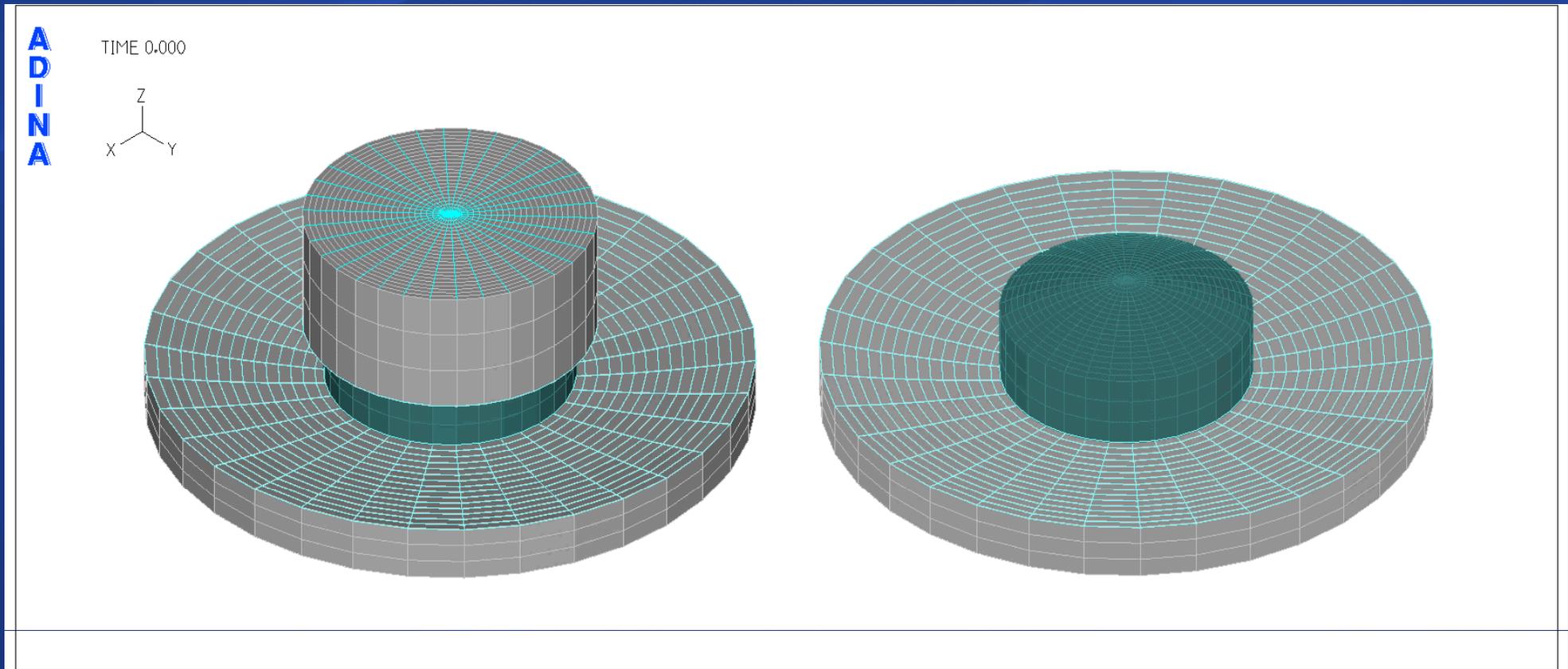


# Isolatori a pendolo scorrevole

Modelli numerici

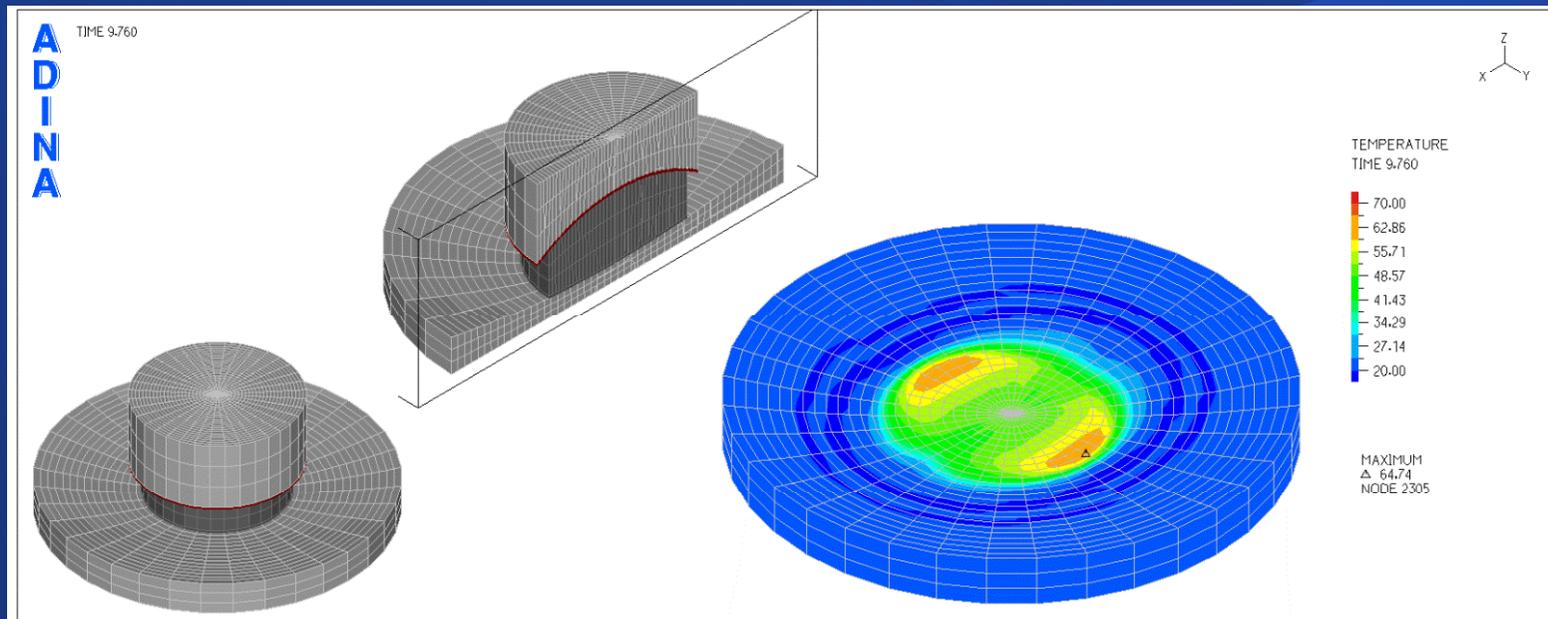
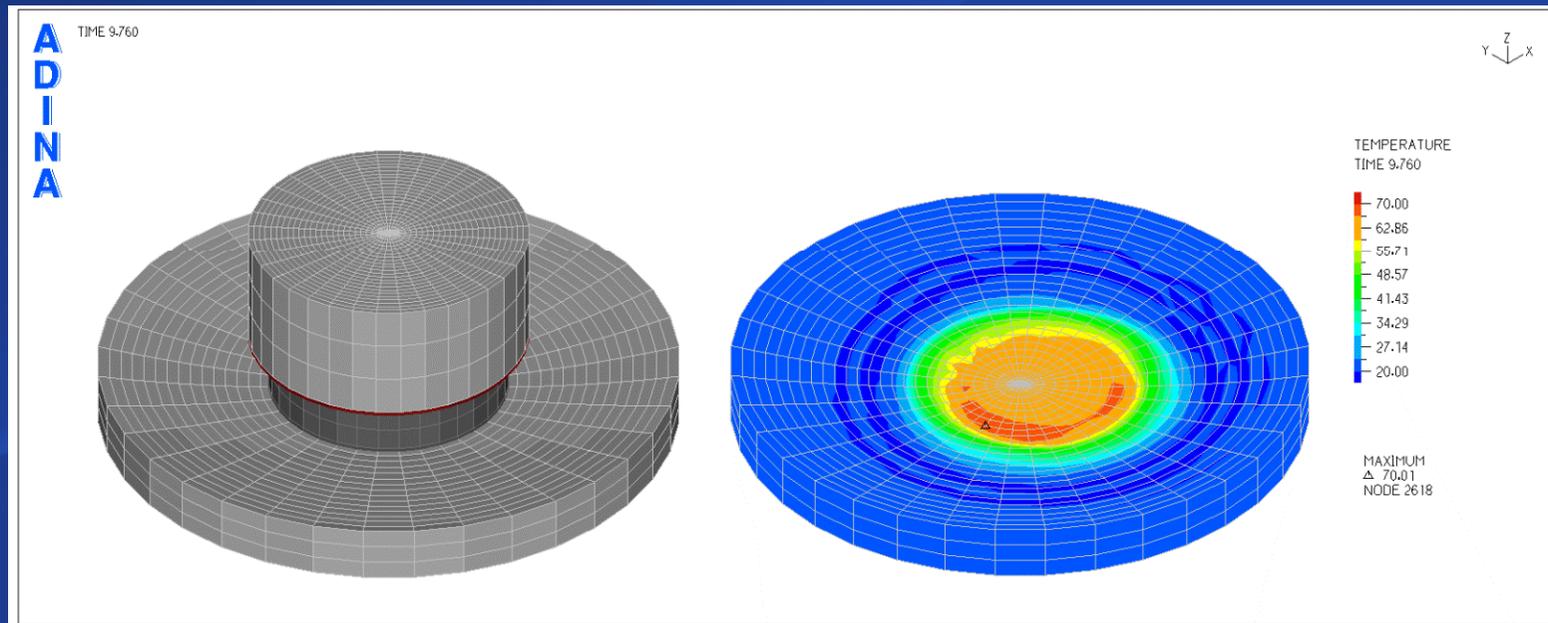
Effetti dovuti alla variazione del coeff. di attrito con la pressione

Rotazione dello slider per effetto di una distribuzione irregolare della risultante delle forze di attrito – Caso estremo



# Isolatori a pendolo scorrevole

Modelli numerici – Modello termo-meccanico



# Isolatori a pendolo scorrevole

Modelli numerici – Modello termo-meccanico

**MONO-DIRECTIONAL TEST (LONGITUDINAL)**



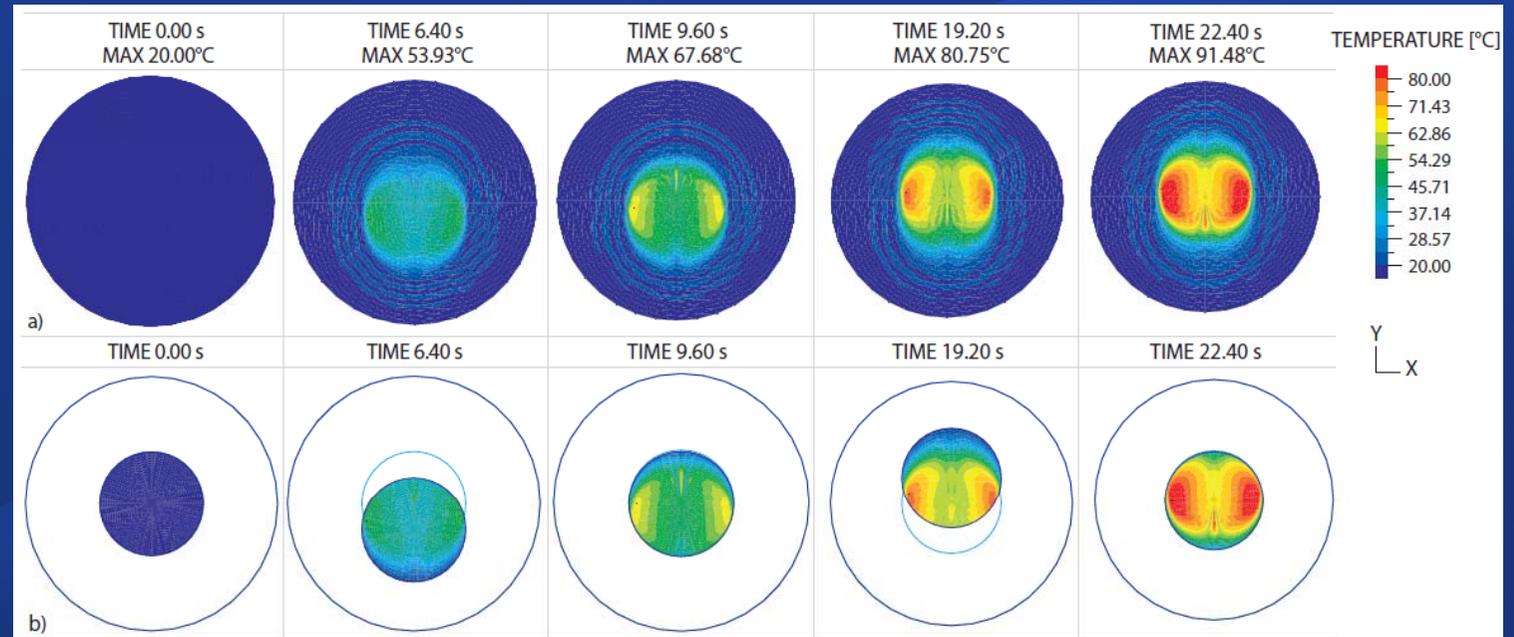
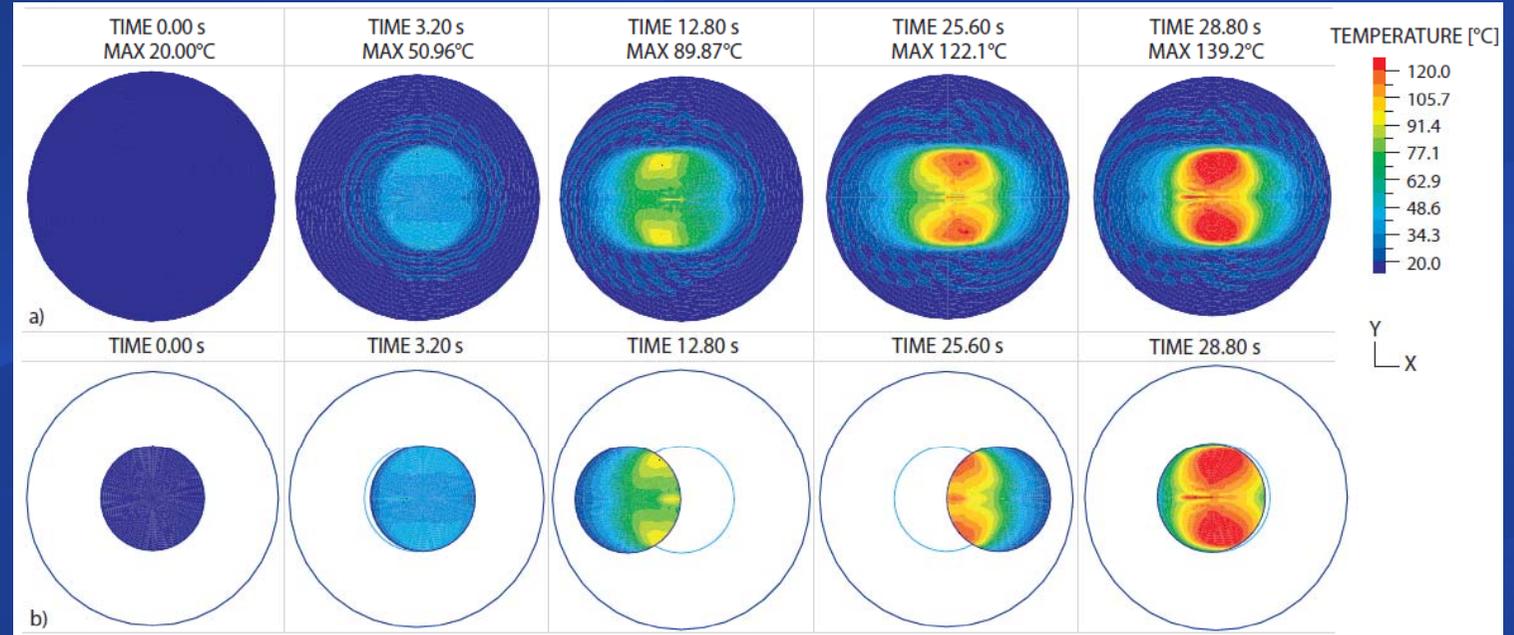
*direzione del moto*

*L'incremento di temperatura non è uniforme ... la pressione di contatto cresce dal centro verso il perimetro dello slider, perpendicolarmente alla direzione istantanea del moto*

**MONO-DIRECTIONAL TEST (LATERAL)**



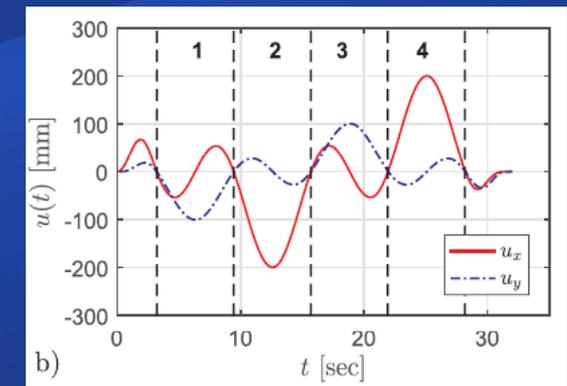
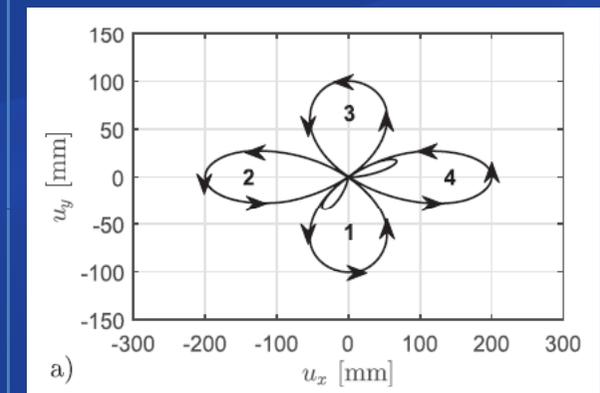
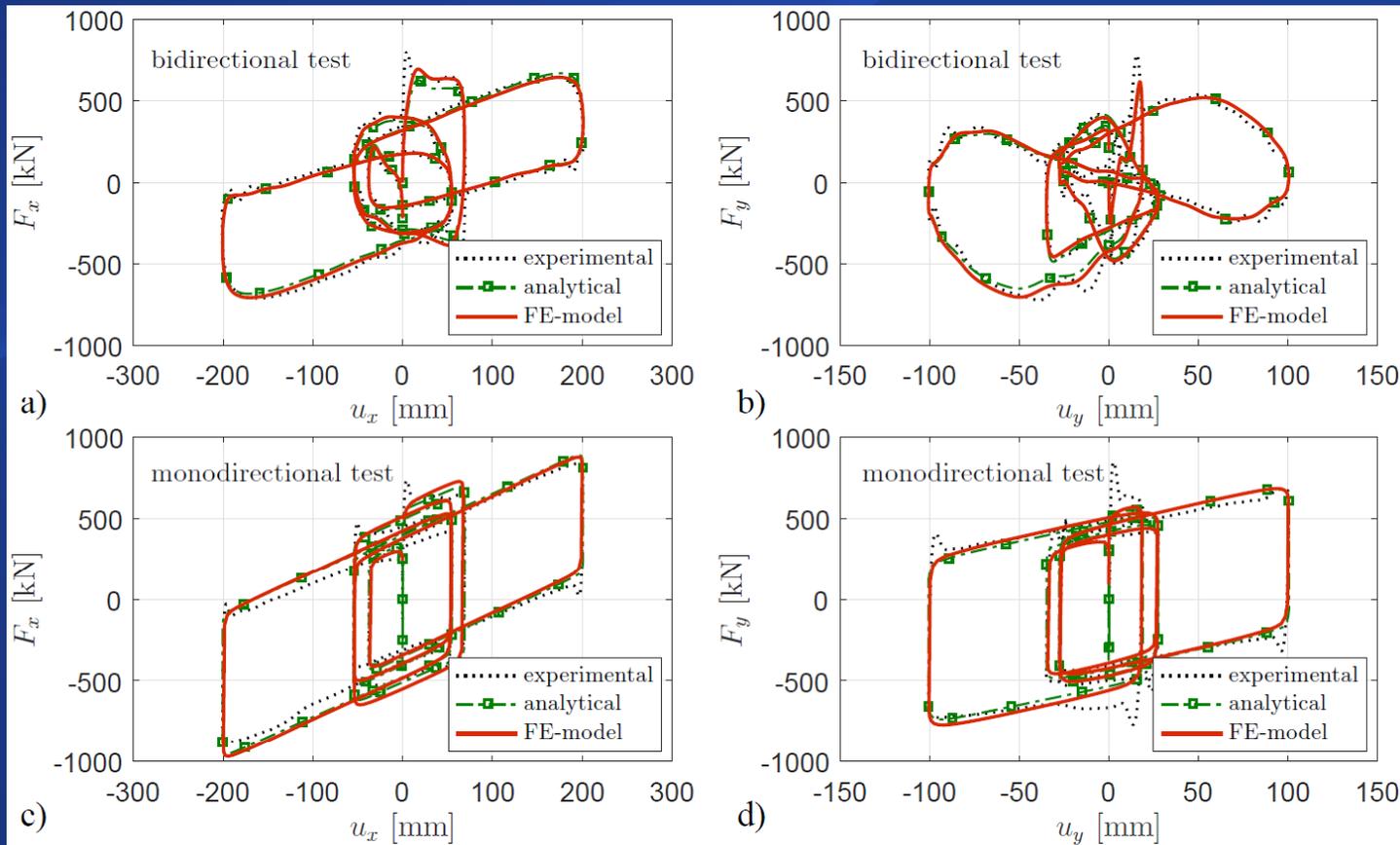
*direzione del moto*



# Isolatori a pendolo scorrevole

## Modelli numerici – Modello termo-meccanico

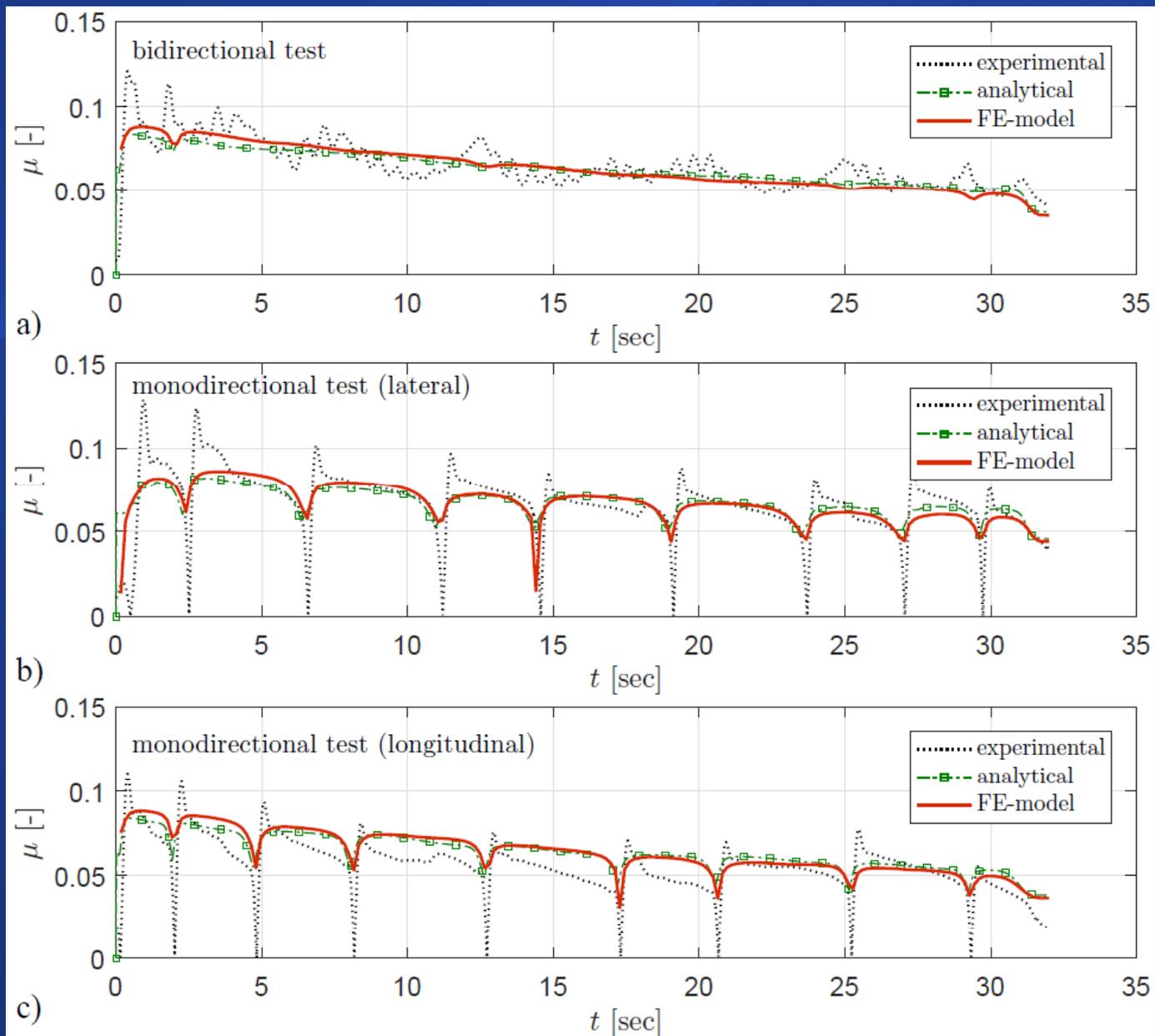
- I risultati sperimentali sono in buon accordo con quelli provenienti da quello numerico (FE), anche nel caso di test bidirezionale



- I cicli di isteresi si riducono nei cicli successivi, a causa del degrado dell'attrito che decresce monotonicamente durante il test

# Isolatori a pendolo scorrevole

## Modelli numerici – Modello termo-meccanico



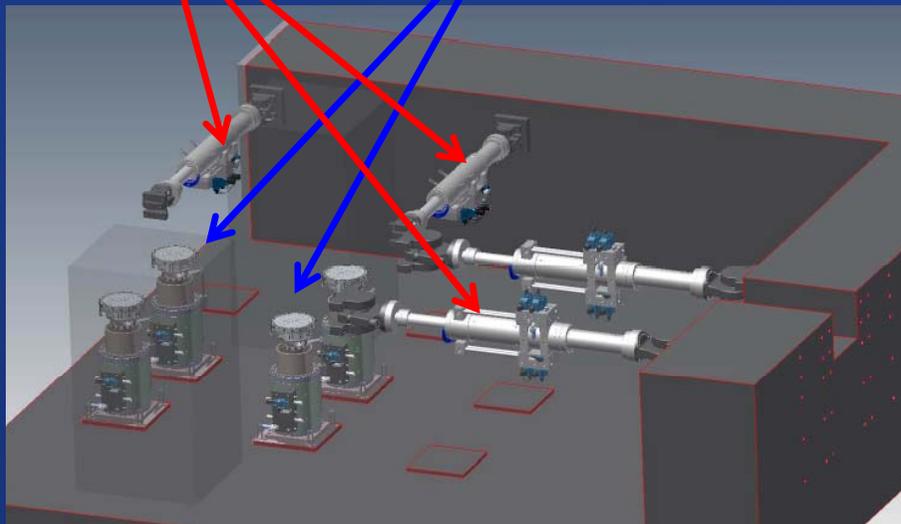
# Sperimentazione



Materiale ad attrito: UHMWPE,  
 $\mu_{\min} = 5.5\%$

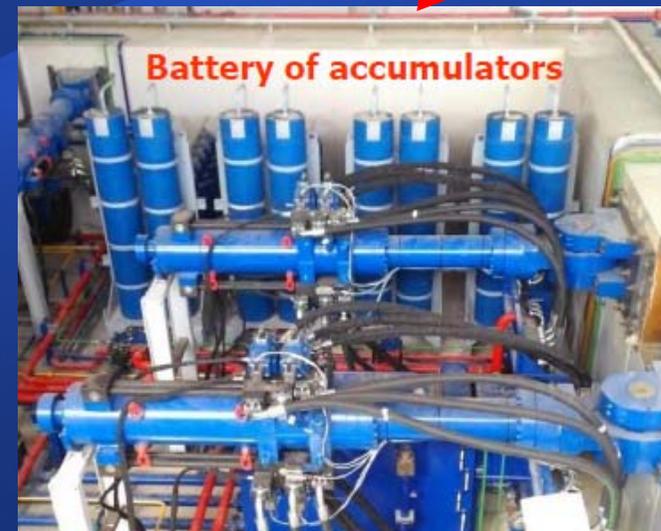
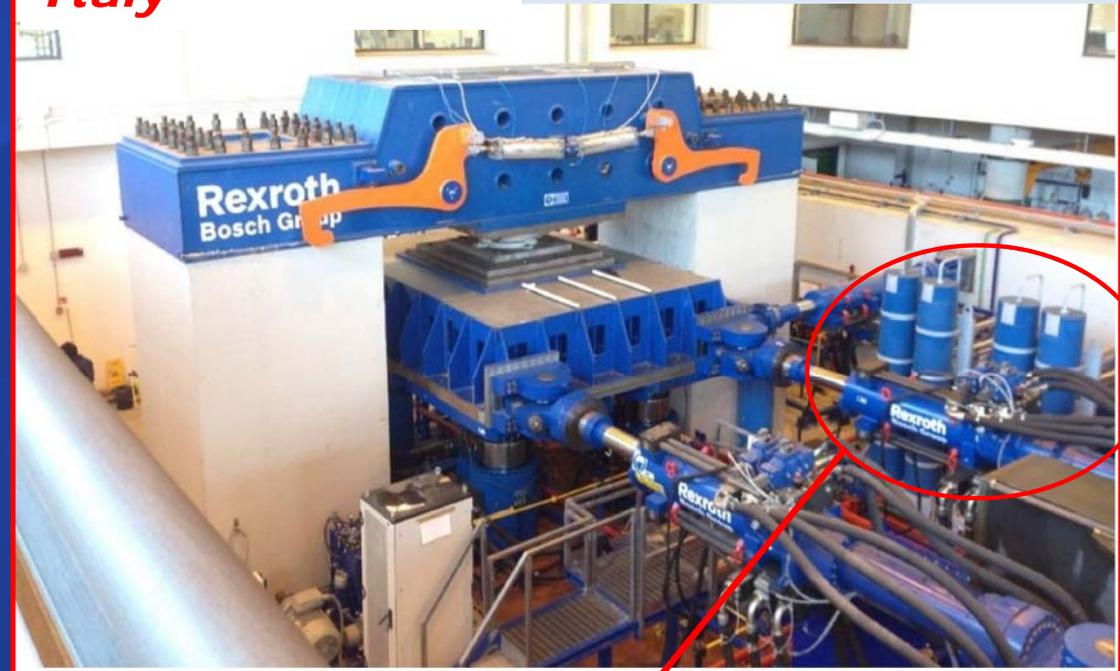
**2 coppie di  
attuatori  
orizzontali**

**4 attuatori verticali  
con pad idrostatici  
(coeff. di attrito  
<0.00035)**

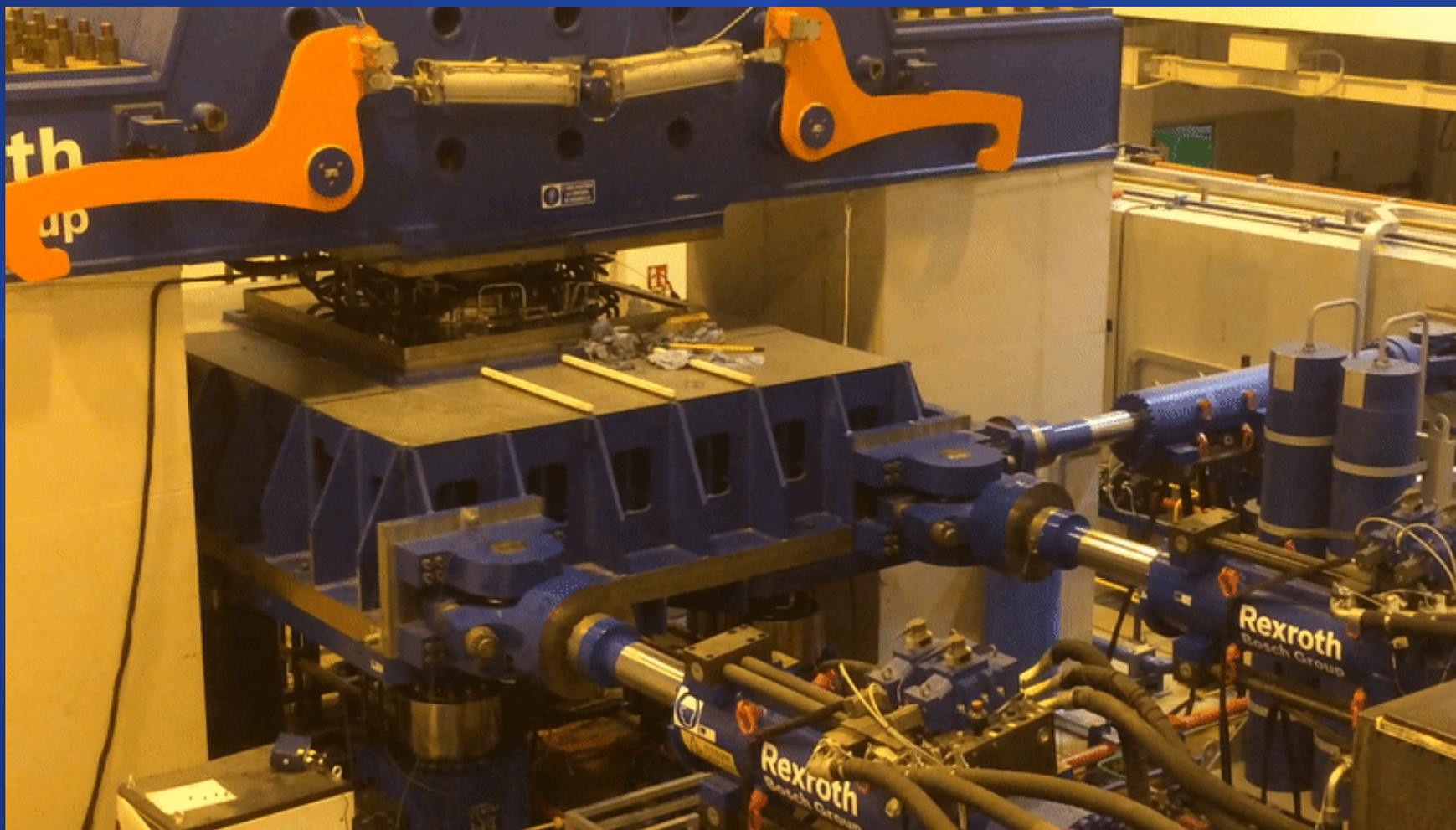


**Lab. CERISI,  
Univ. of Messina  
Italy**

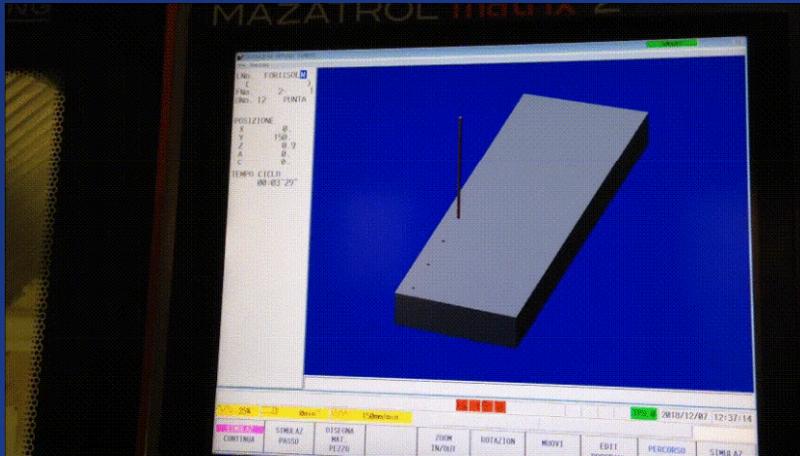
**Load capacity 3100kN  
Stroke of actuators +/- 550mm  
Maximum velocities 1100 mm/s**



## Sperimentazione su pad idrostatico



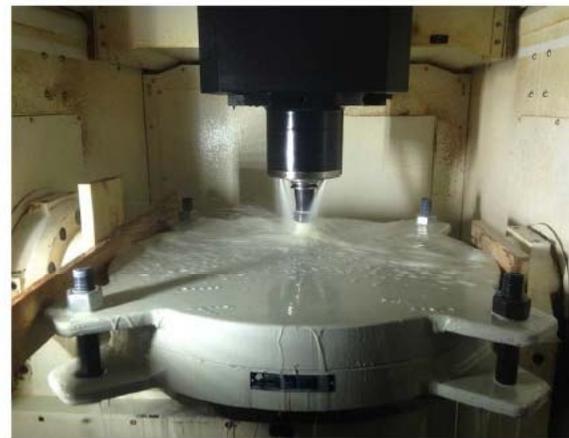
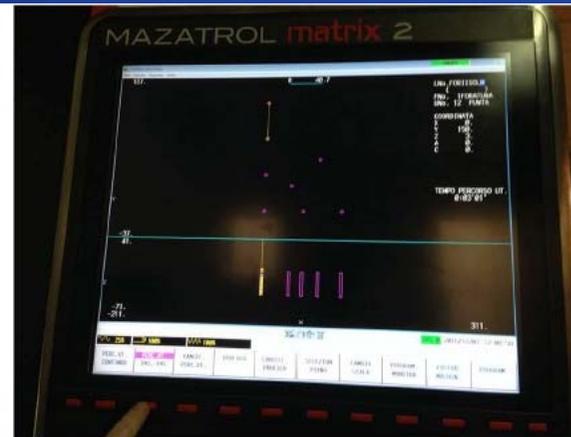
# Isolatori a pendolo scorrevole - Sperimentazione



*La piastra di scorrimento superiore del DCSS è stata modificata utilizzando una fresatrice a controllo numerico (CNC) per realizzare i fori di alloggiamento delle 8 termocoppie*

*Sono state impiegate 8 termocoppie tipo J con range di misura da  $-60^{\circ}\text{C}$  a  $+350^{\circ}\text{C}$*

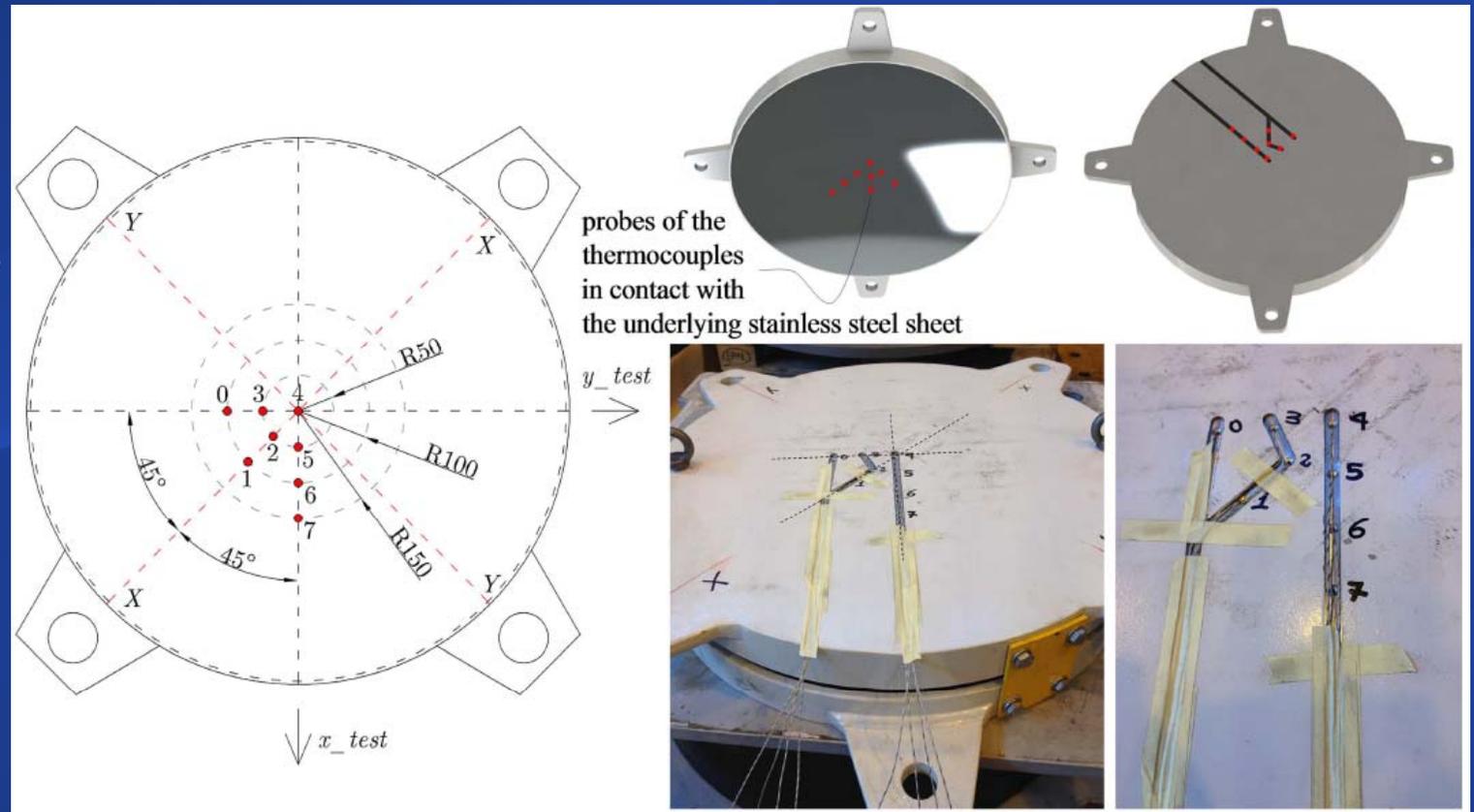
*Le termocoppie sono state installate a contatto con la superficie di scorrimento superiore costituita da un foglio di acciaio inossidabile lucidato da 2.5 mm di spessore*



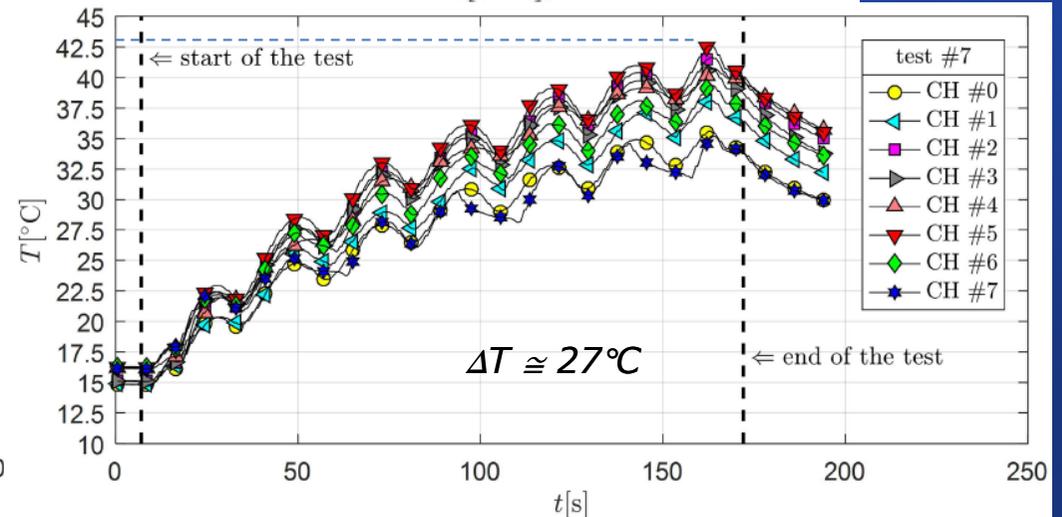
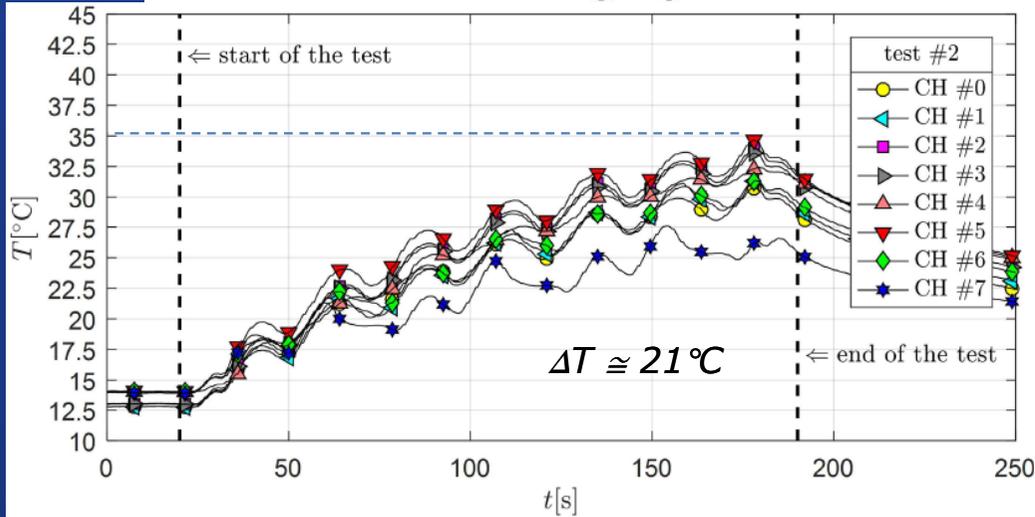
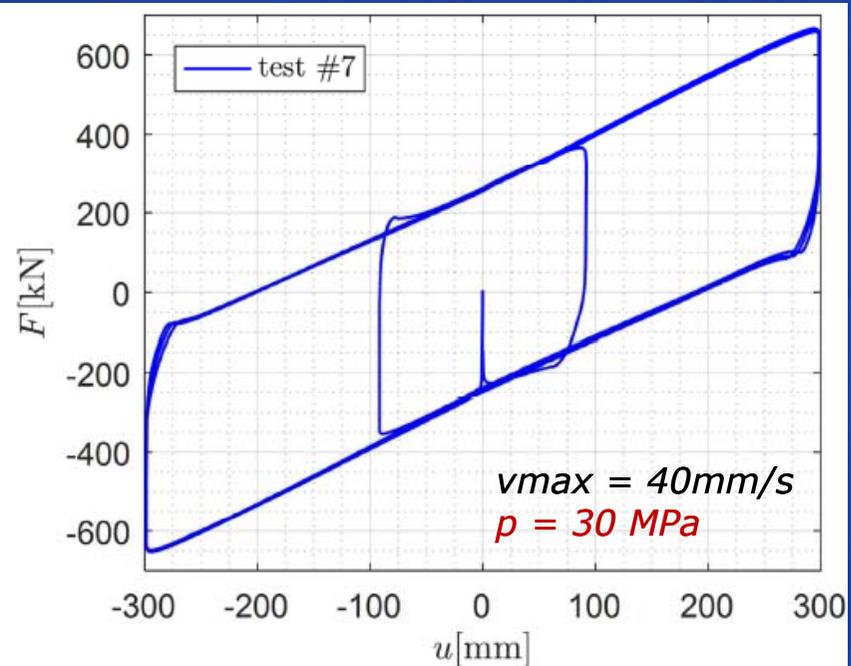
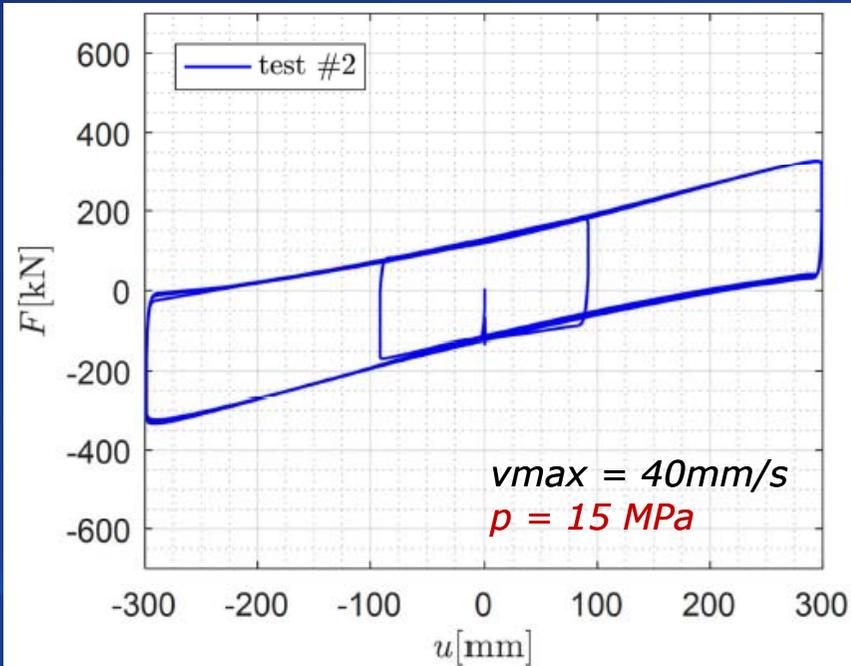
# Isolatori a pendolo scorrevole - Sperimentazione

*La posizione delle termocoppie è stata opportunamente scelta per ottenere una mappa sufficientemente accurata dell'andamento delle temperature sulla superficie di scorrimento*

*Particolare cura è stata messa nella predisposizione degli alloggiamenti per il passaggio dei cavi di collegamento delle termocoppie alla centralina di acquisizione*

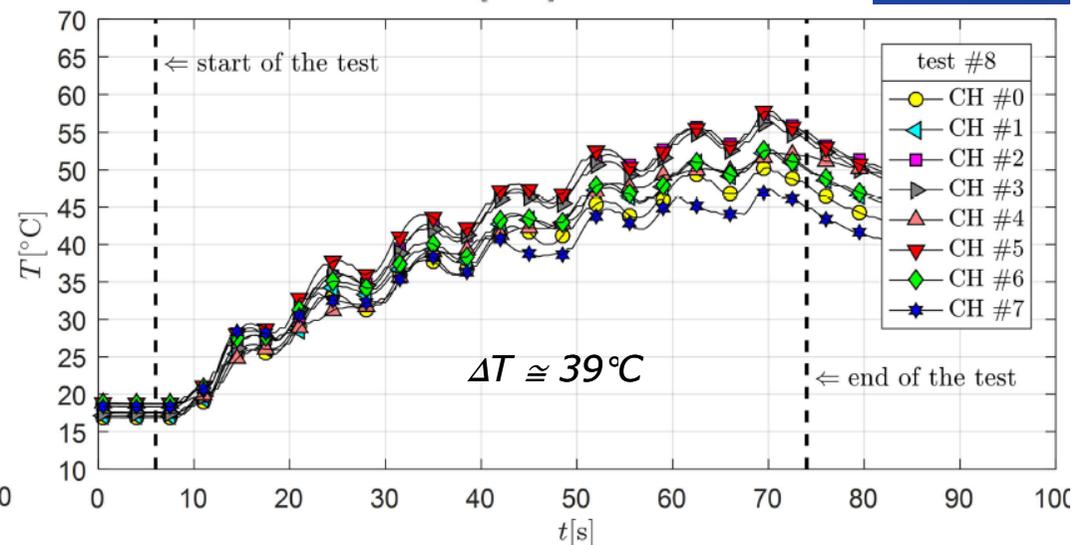
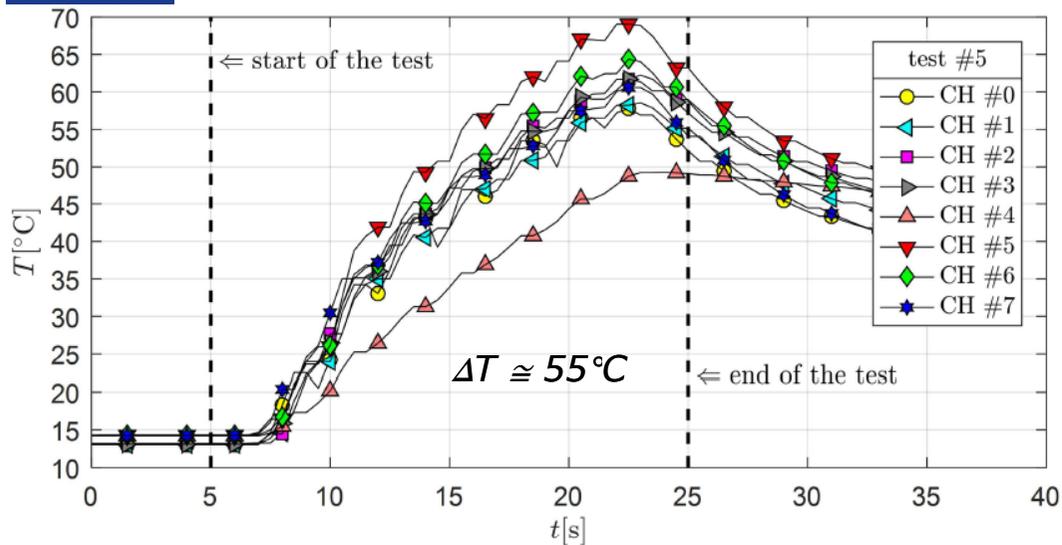
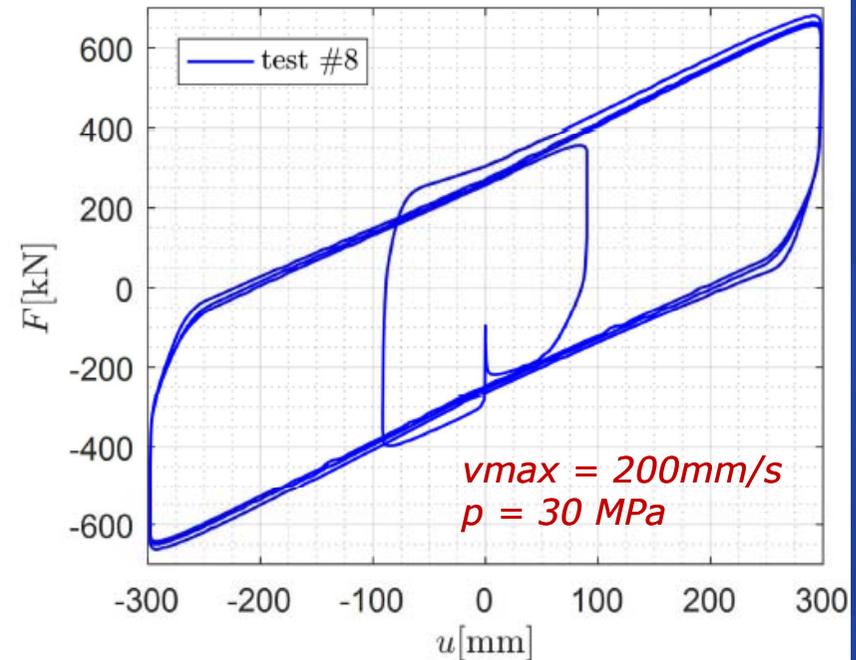
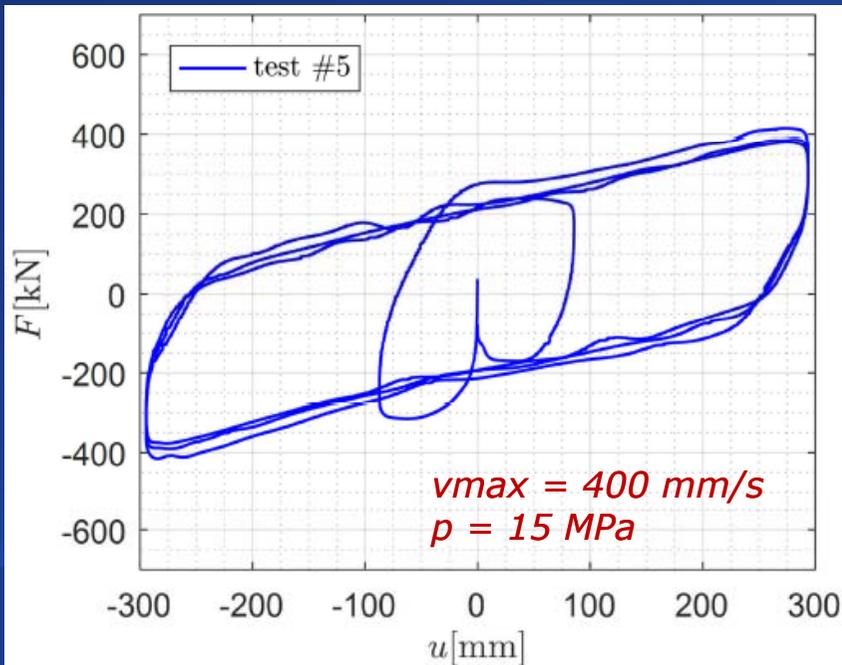


# Isolatori a pendolo scorrevole - Sperimentazione



- I tre cicli sono quasi sovrapposti, senza una significativa differenza tra il primo e il terzo. È il caso del materiale UHMWPE (polietilene ad altissimo peso molecolare)
- "Thermal control of friction" (Ettles, 1986) e "flash temperature" (Stachowiak, 2005)

# Isolatori a pendolo scorrevole - Sperimentazione



*I cicli di isteresi tendono a ridursi nel tempo, a causa della variazione del coefficiente di attrito dovuto dell'aumento di temperatura*

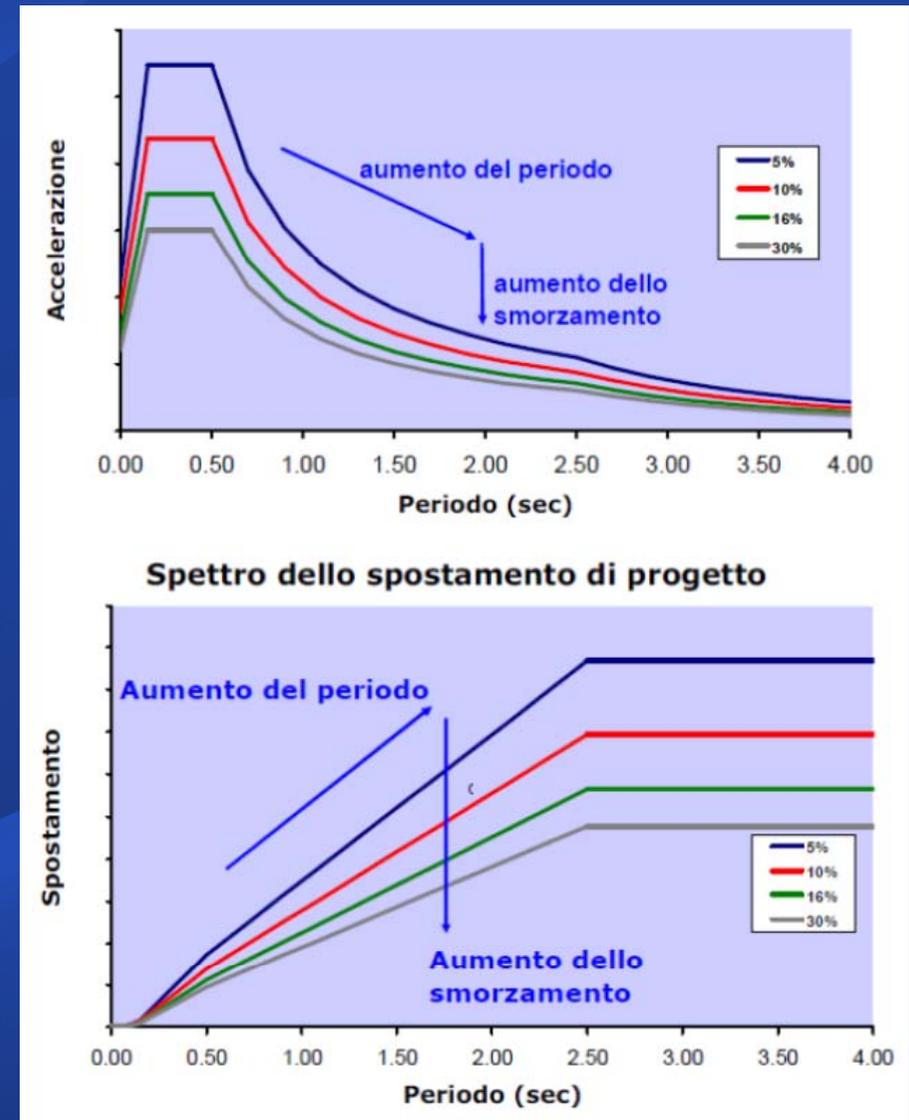
## Osservazioni

- Da quanto visto, risulta chiara **l'importanza delle prove sperimentali** e dei protocolli da rispettare per acquisire informazioni utili per la corretta modellazione dei dispositivi di isolamento
- Ciò nell'ottica di fornire informazioni utili all'ingegnere strutturista per la caratterizzazione dei parametri di comportamento e per una **corretta previsione del comportamento della struttura** soggetta a sisma
- Dovrebbe essere **interesse del progettista** di non accontentarsi delle prescrizioni normative che forniscono solo informazioni incomplete o parziali sul funzionamento dei dispositivi, ma di pretendere dalla sperimentazione tutto ciò che è necessario al suo lavoro
- Il panorama mondiale dei **sistemi di prova** si è arricchito recentemente di nuove realtà, a disposizione dei produttori e dei professionisti, nonché della comunità scientifica che può approfondire gli aspetti prima evidenziati

## **Richiesta di duttilità del sistema di isolamento**

## Richiesta di duttilità

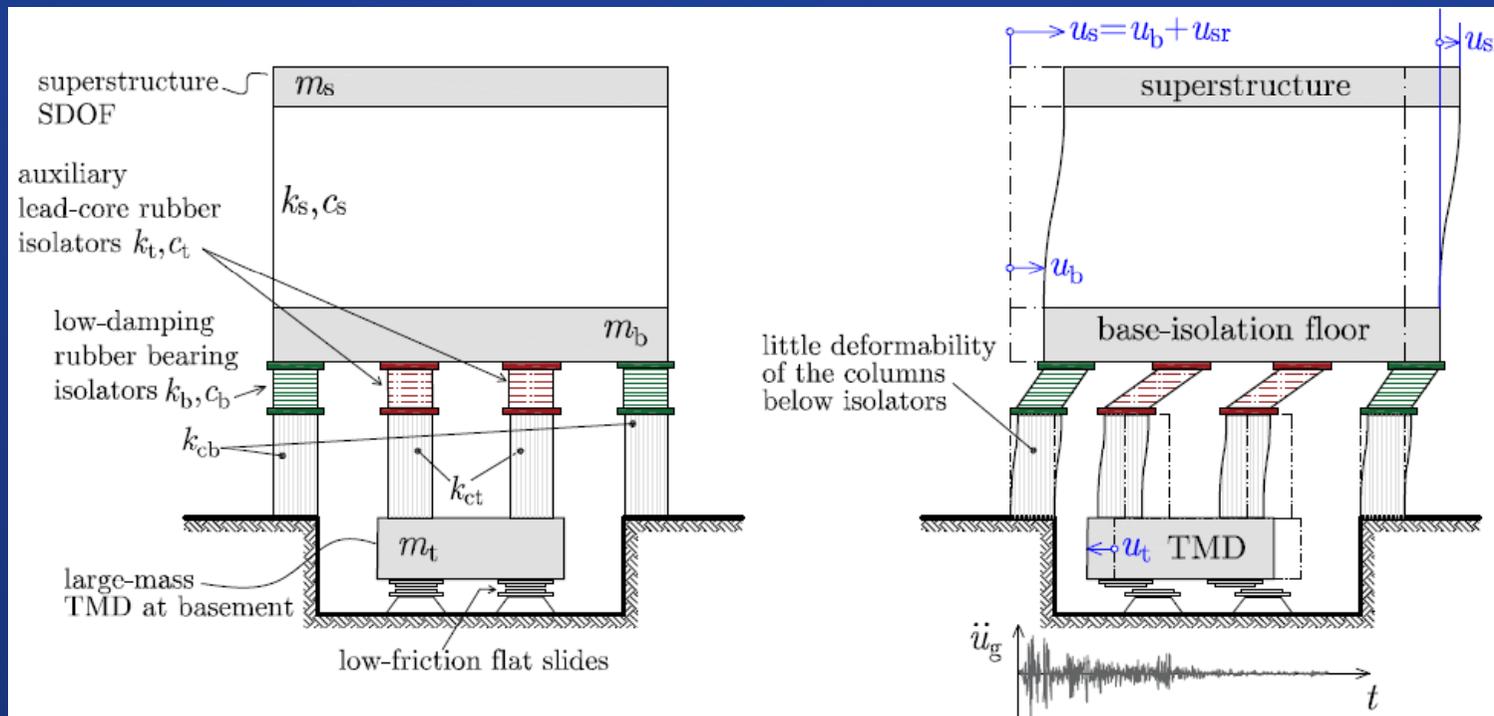
- L'isolamento ad alti periodi produce per il sistema di isolamento spostamenti spesso incompatibili con le “condizioni al contorno”
- È il caso di strutture contigue con esigui giunti sismici
- Un incremento dello smorzamento può ridurre gli spostamenti attesi del sistema di isolamento, ma ciò genera una esaltazione della risposta della struttura in elevazione alle alte frequenze: effetti dannosi per le parti infrastrutturali (tramezzi, impianti, ecc.)



- **Quale può essere la soluzione?**

## TMD in accoppiamento al sistema di isolamento

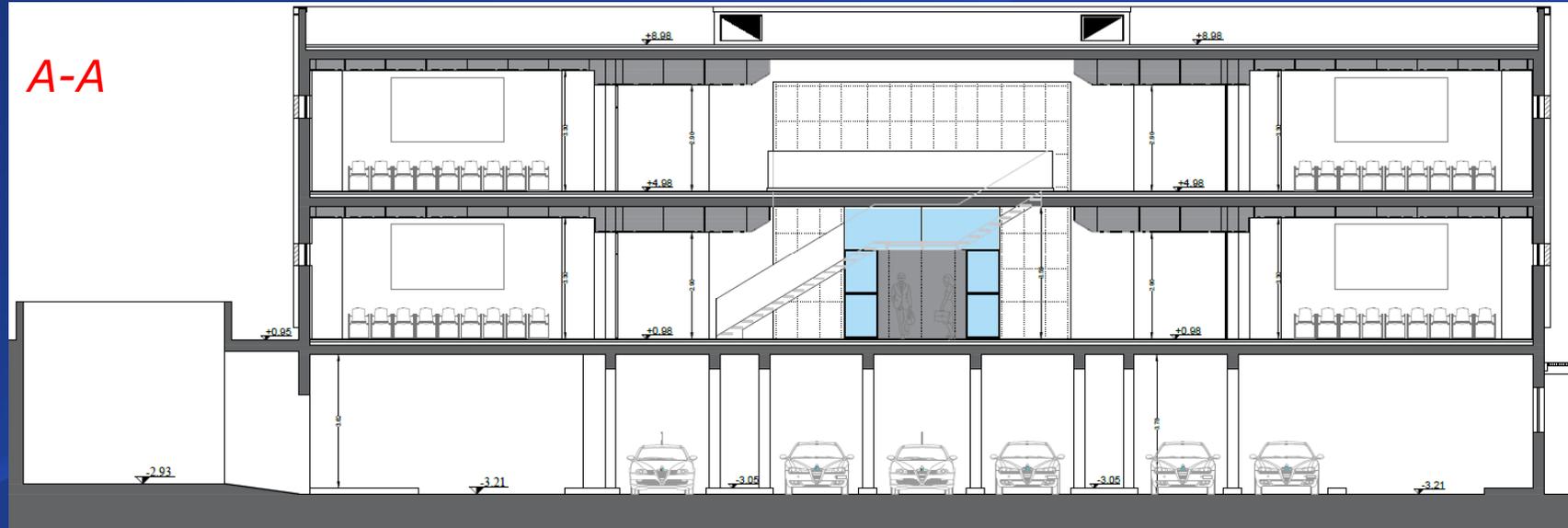
- L'impiego di uno smorzatore a massa accordata (Tuned Mass Damper – TMD) può determinare un complesso di effetti benefici:
  - riduzione della richiesta di duttilità del sistema di isolamento (minori spostamenti della base)
  - migliore comportamento della struttura in elevazione (salvaguardia delle parti infrastrutturali: minori accelerazioni assolute)



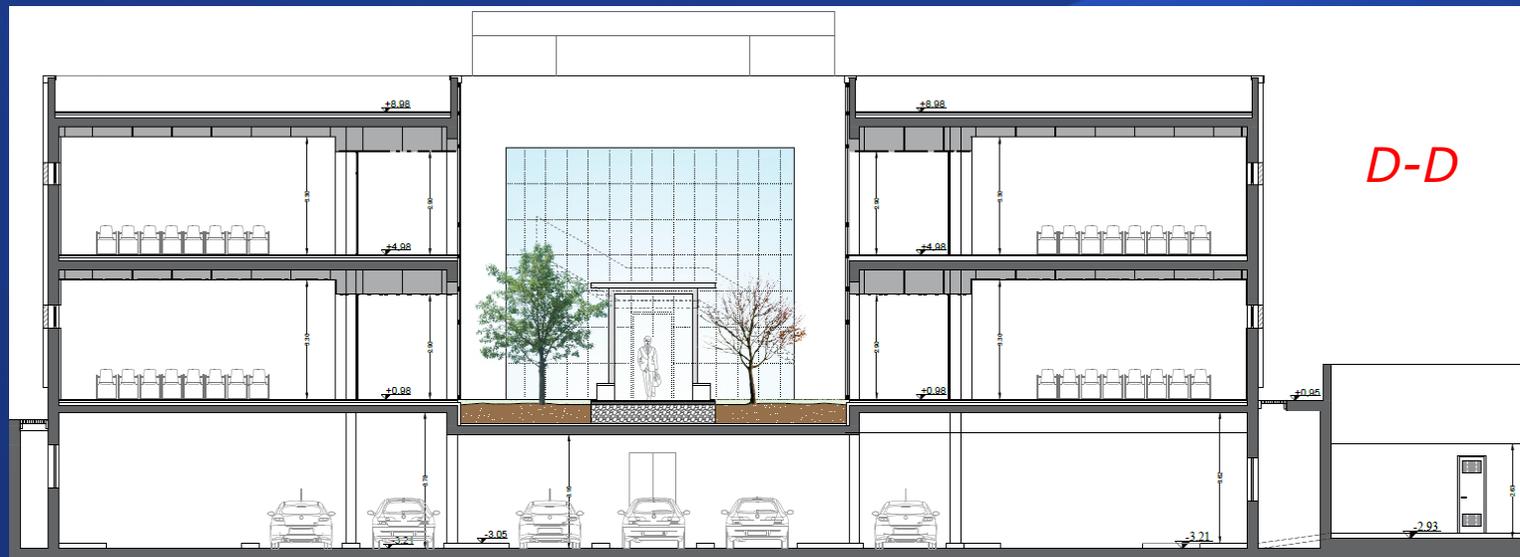
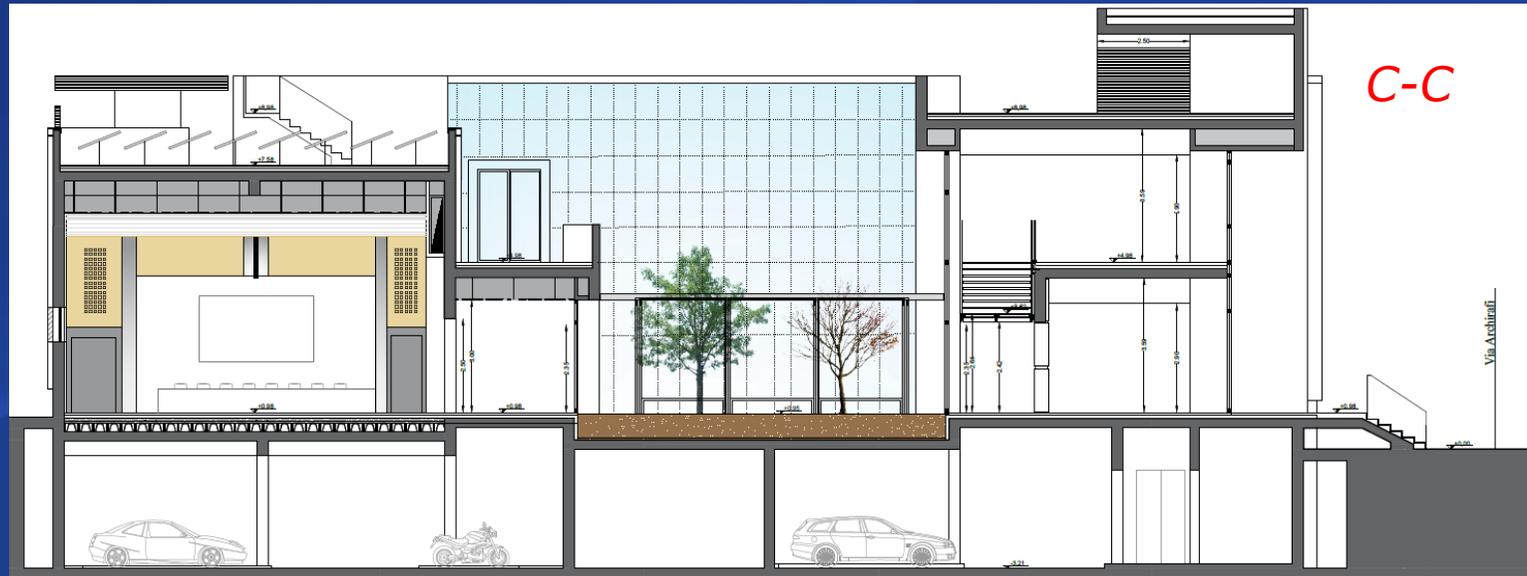
# TMD in accoppiamento al sistema di isolamento



# TMD in accoppiamento al sistema di isolamento

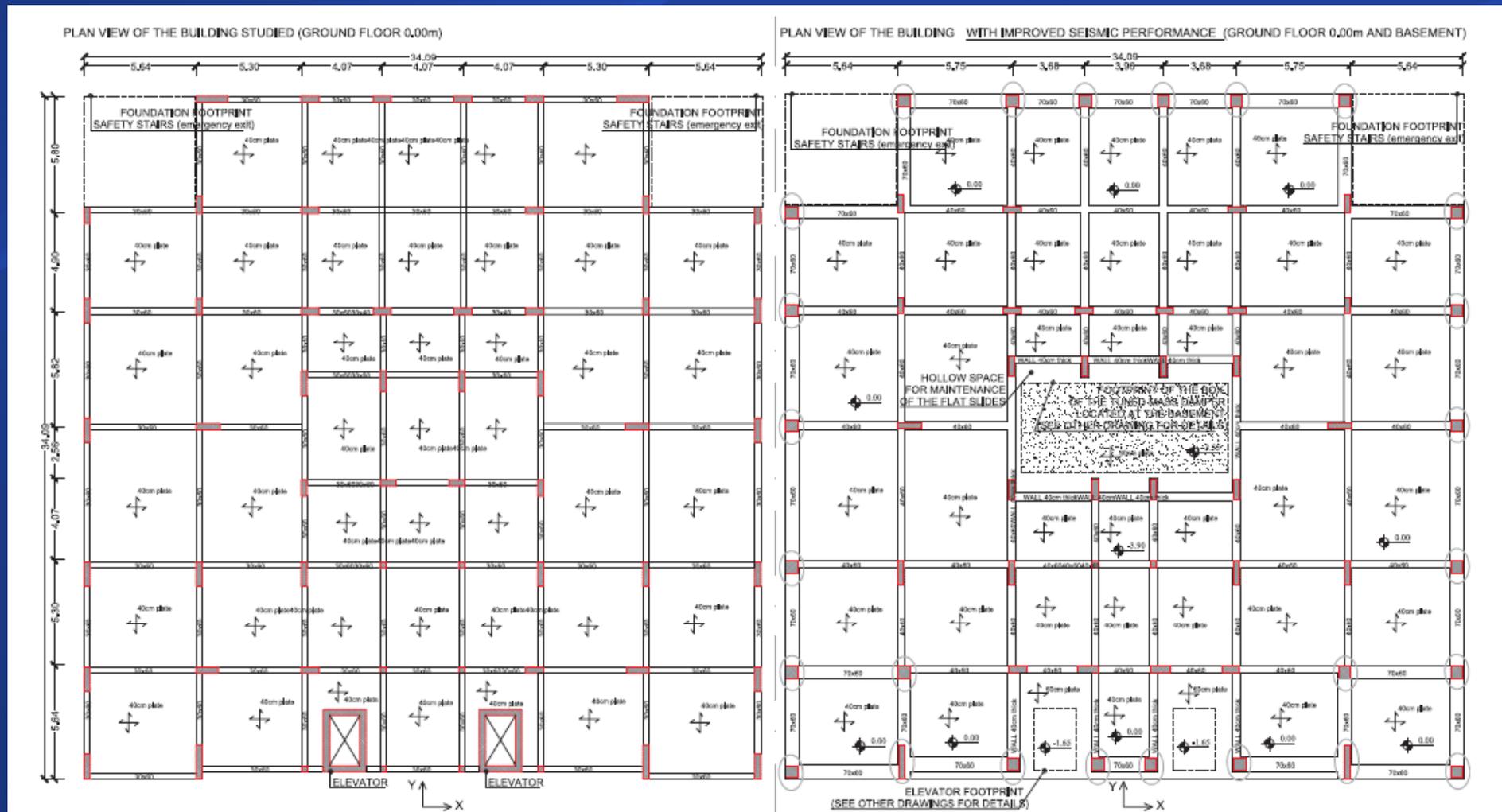


# TMD in accoppiamento al sistema di isolamento

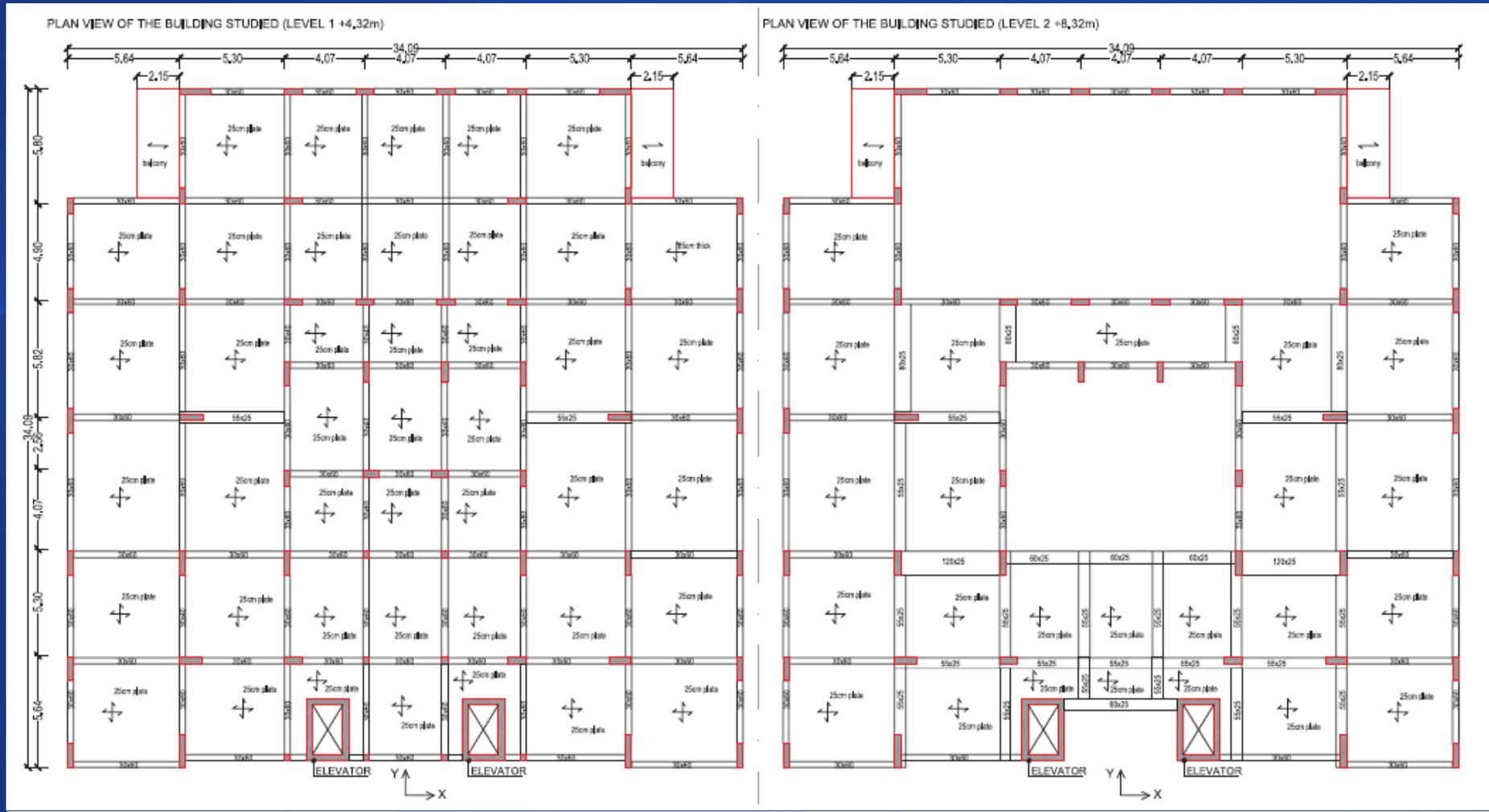


# TMD in accoppiamento al sistema di isolamento

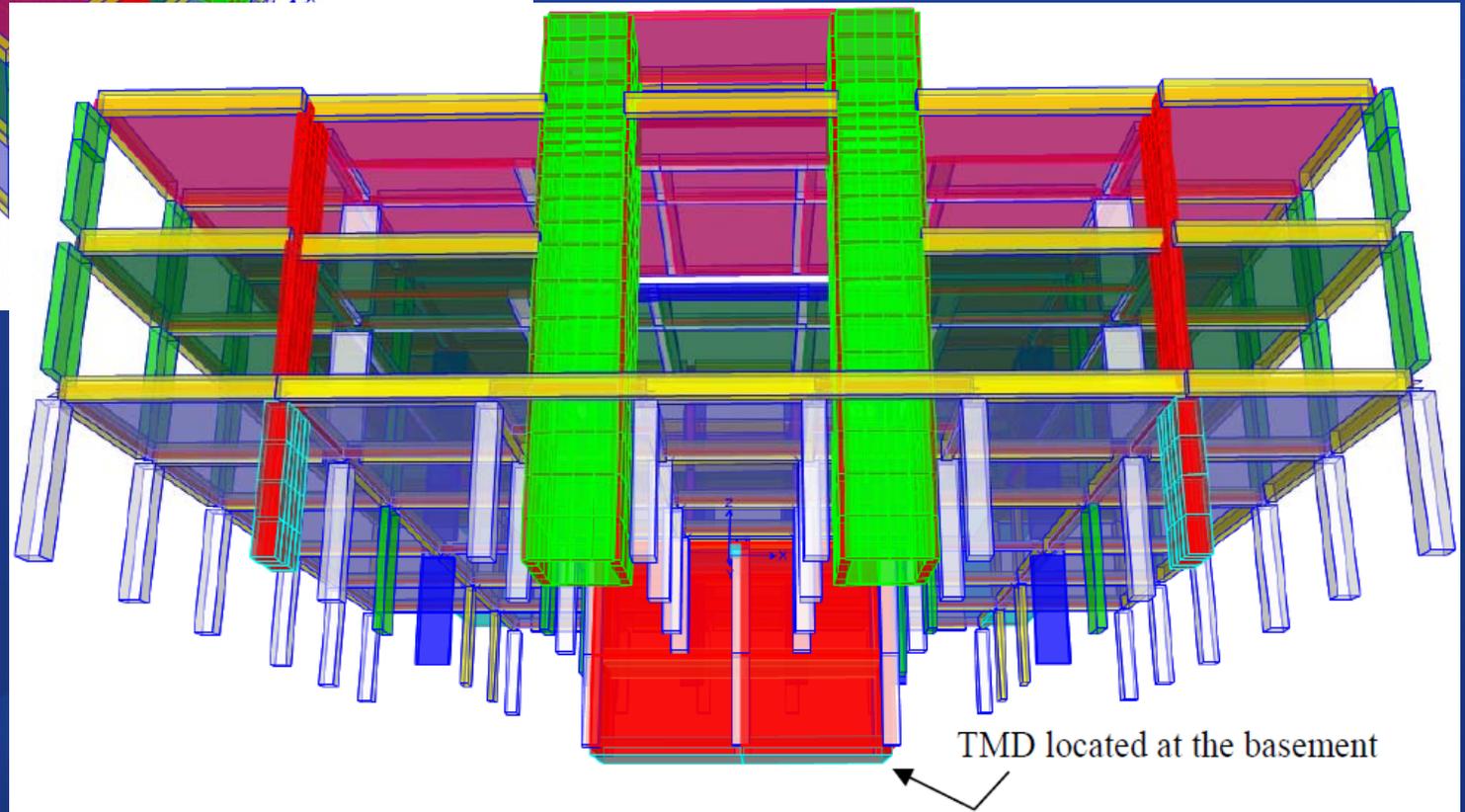
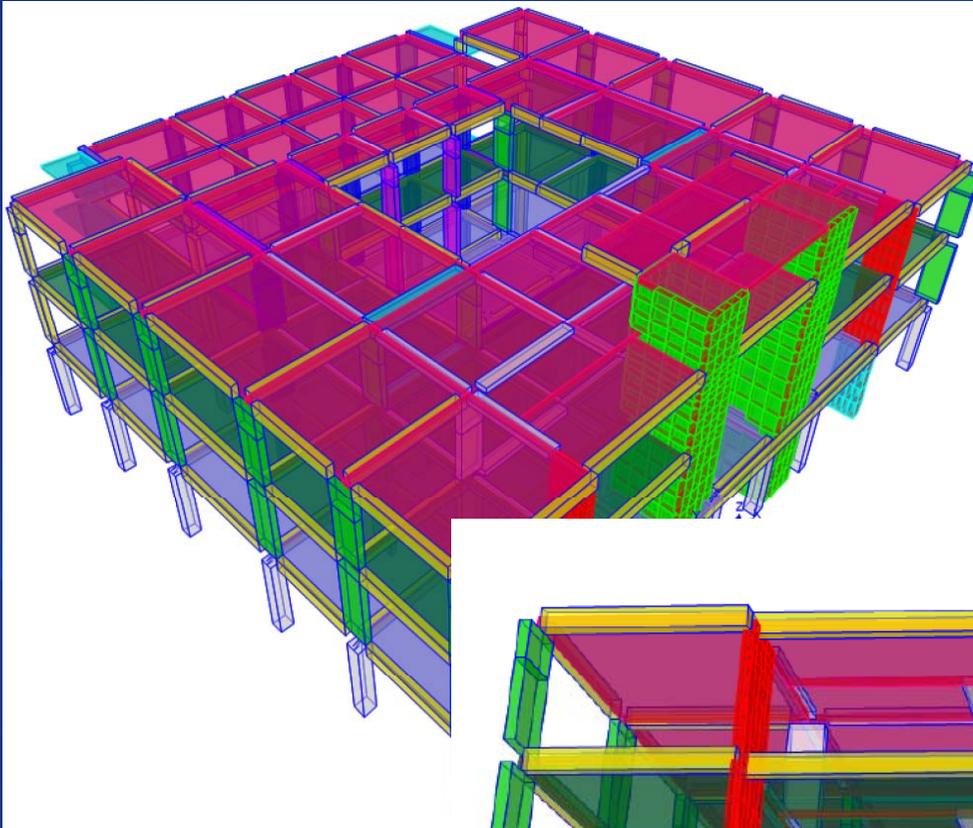
$$\mu = \frac{M_{TMD}}{M_{Struttura}} = 0.18$$



# TMD in accoppiamento al sistema di isolamento



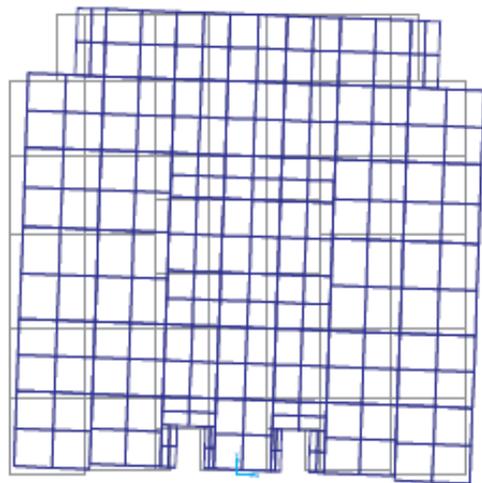
# TMD in accoppiamento al sistema di isolamento



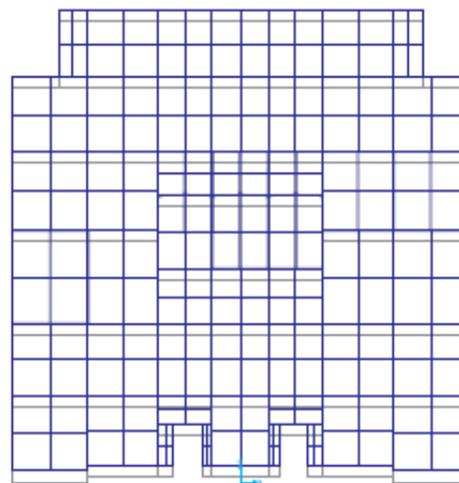
TMD located at the basement

# TMD in accoppiamento al sistema di isolamento

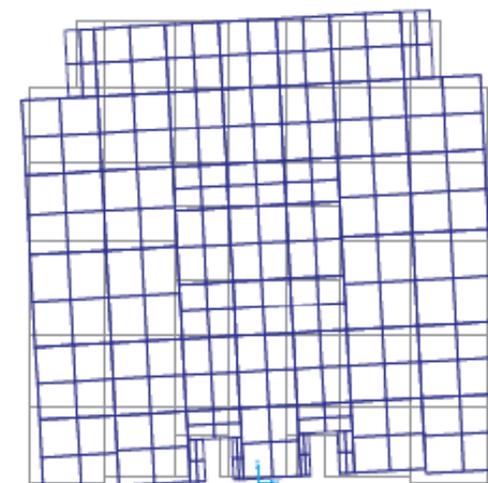
- Primi tre modi di vibrare: struttura a base fissa e struttura isolata



$$T_1 = 0.38 \text{ s}, \bar{M}_{\%x} = 61\%, \bar{M}_{\%y} = 0\%, \bar{M}_{\%z} = 73\%$$

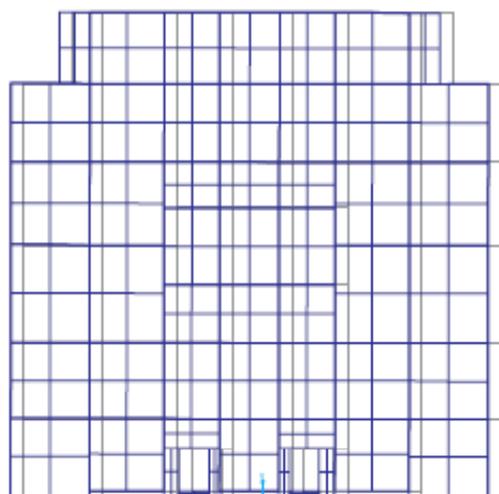


$$T_2 = 0.3 \text{ s}, \bar{M}_{\%x} = 0\%, \bar{M}_{\%y} = 72\%, \bar{M}_{\%z} = 0\%$$

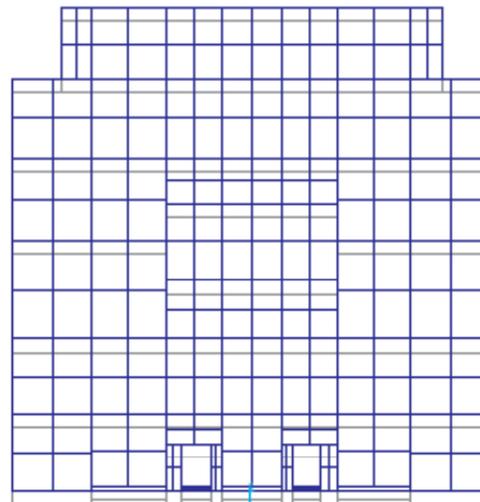


$$T_3 = 0.297 \text{ s}, \bar{M}_{\%x} = 14\%, \bar{M}_{\%y} = 0\%, \bar{M}_{\%z} = 7.2\%$$

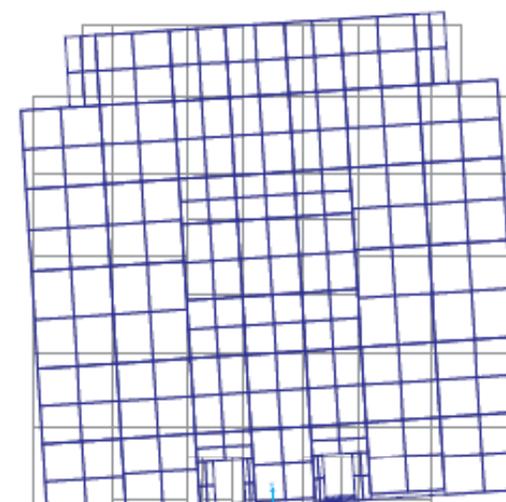
**Base  
fissa**



$$T_1 = 3.0 \text{ s}, \bar{M}_{\%x} = 95\%, \bar{M}_{\%y} = 0\%, \bar{M}_{\%z} = 46\%$$



$$T_2 = 3.0 \text{ s}, \bar{M}_{\%x} = 0\%, \bar{M}_{\%y} = 95\%, \bar{M}_{\%z} = 0\%$$

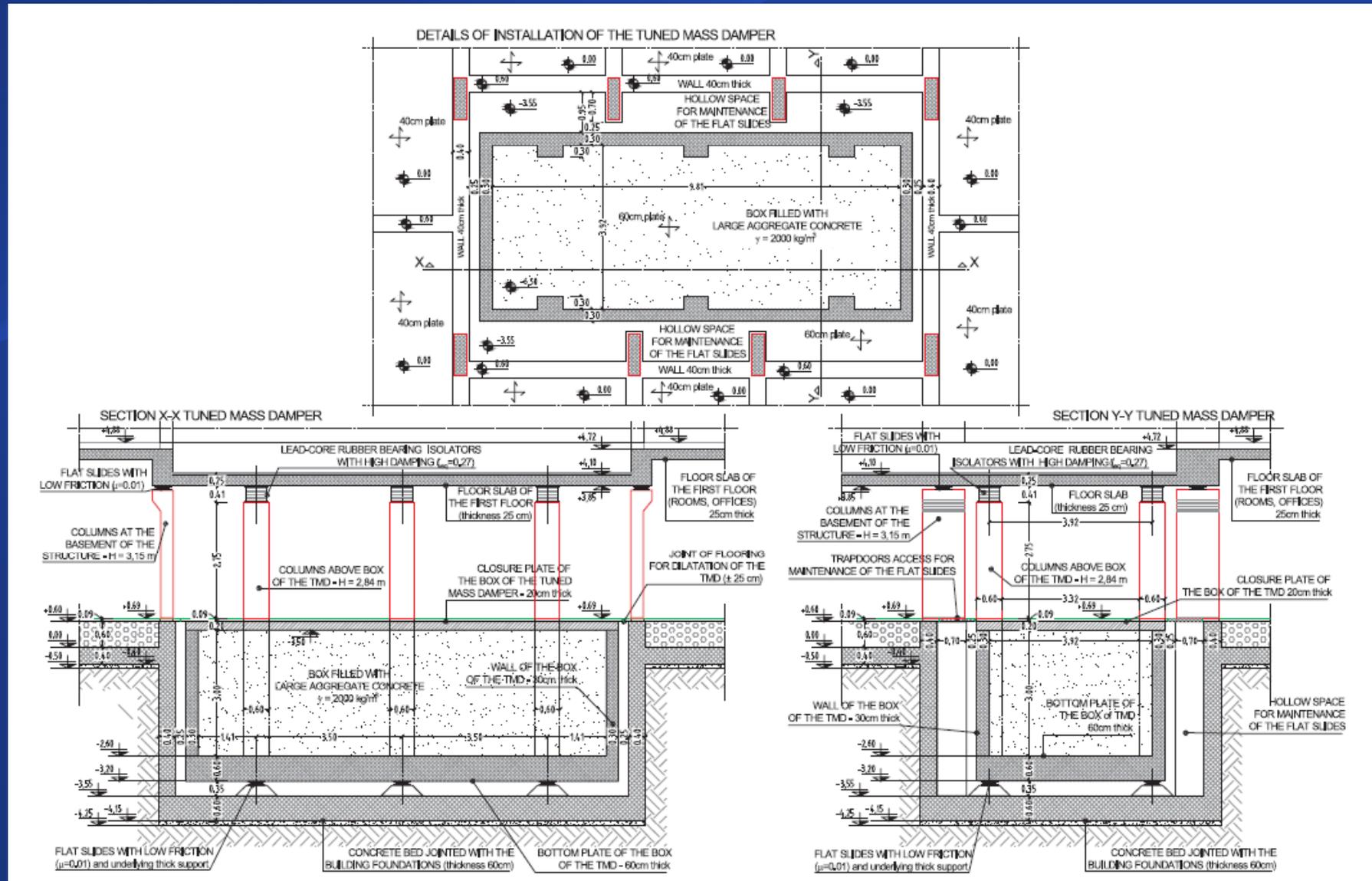


$$T_3 = 1.93 \text{ s}, \bar{M}_{\%x} = 0\%, \bar{M}_{\%y} = 0\%, \bar{M}_{\%z} = 49\%$$

**Struttura  
isolata**

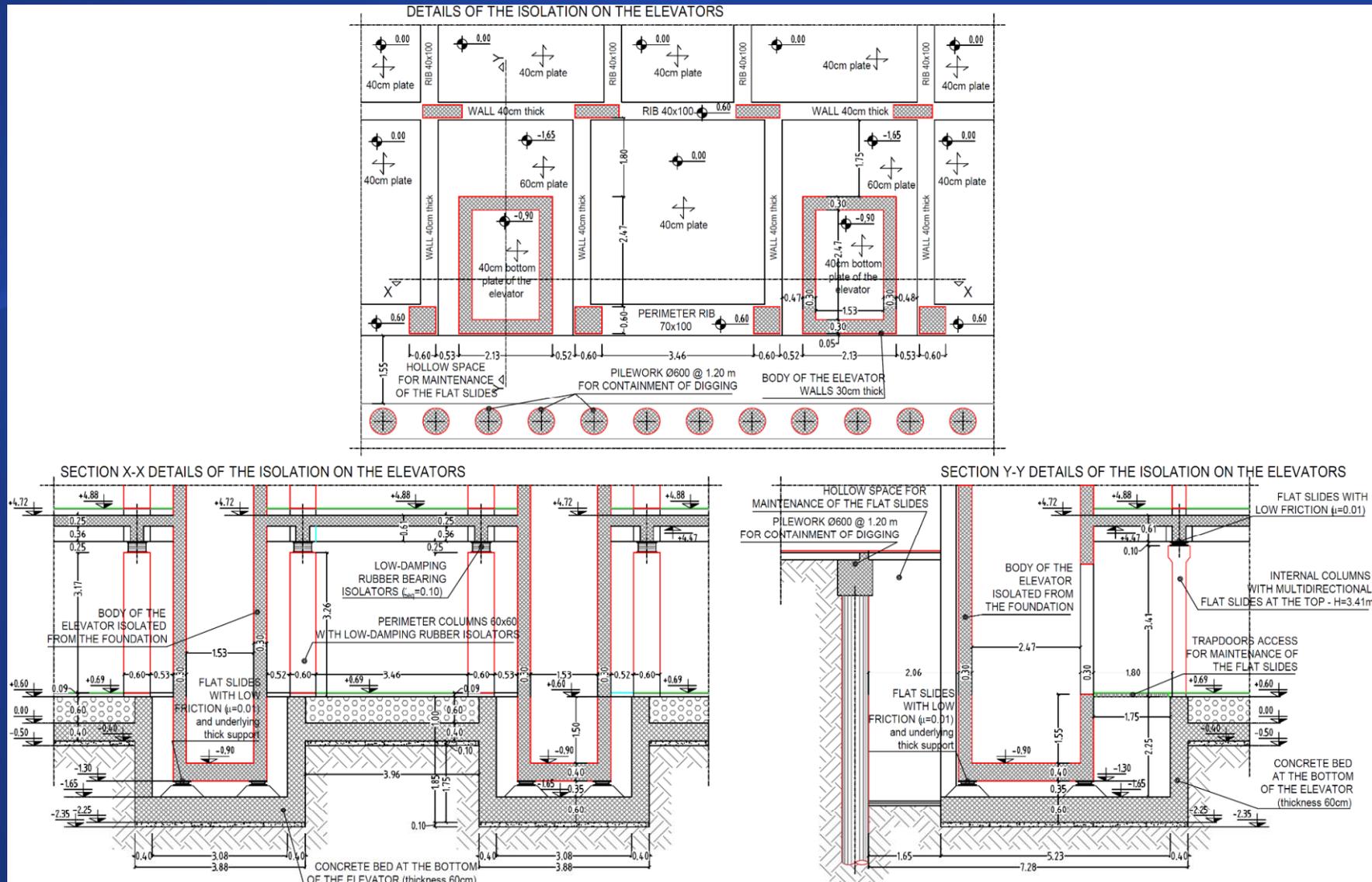
# TMD in accoppiamento al sistema di isolamento

- Particolare del TMD



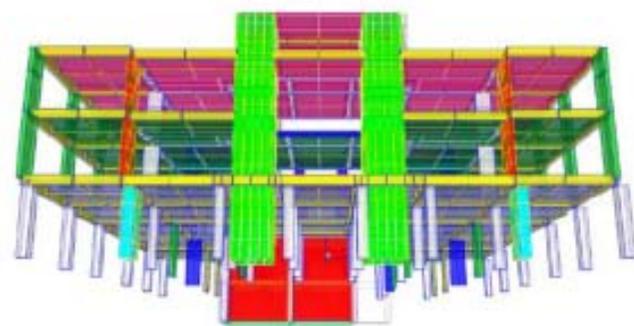
# TMD in accoppiamento al sistema di isolamento

- Particolare della realizzazione dei vani ascensore



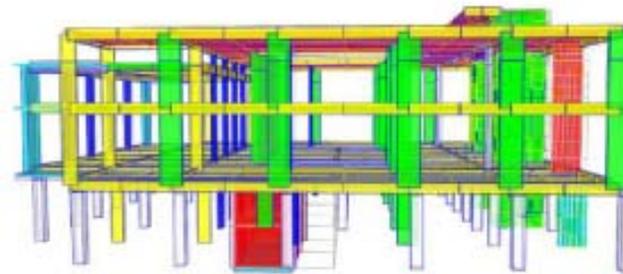
# TMD in accoppiamento al sistema di isolamento

- Primi sei modi di vibrare della struttura isolata + TMD



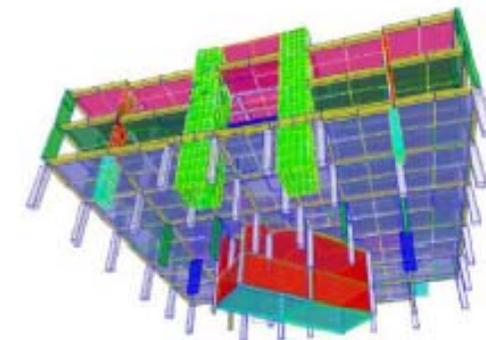
translational mode of the TMD (along X)  
BIS is almost at rest

$$T_1 = 4.54 \text{ s}, \bar{M}_{\%x} = 44\%, \bar{M}_{\%y} = 0\%, \bar{M}_{\%z} = 30\%$$



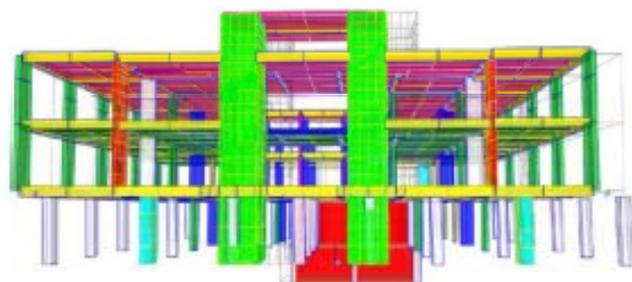
translational mode of the TMD (along Y)  
BIS is almost at rest

$$T_2 = 4.54 \text{ s}, \bar{M}_{\%x} = 0\%, \bar{M}_{\%y} = 44\%, \bar{M}_{\%z} = 0\%$$



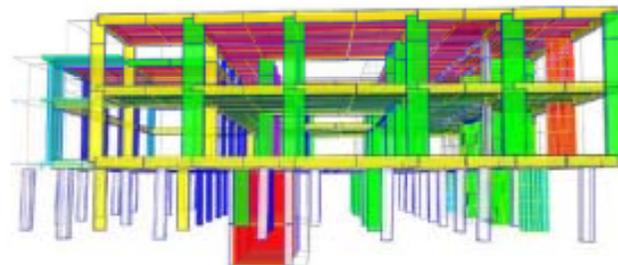
torsional mode of the TMD (rotation about Z)  
BIS is almost at rest

$$T_3 = 3.94 \text{ s}, \bar{M}_{\%x} = 0\%, \bar{M}_{\%y} = 0\%, \bar{M}_{\%z} = 1\%$$



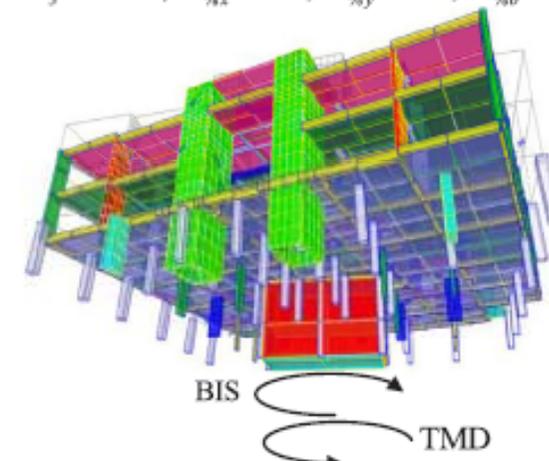
BIS  
TMD  
translational mode of the BIS (along X)  
with TMD out of phase

$$T_4 = 2.74 \text{ s}, \bar{M}_{\%x} = 52\%, \bar{M}_{\%y} = 0\%, \bar{M}_{\%z} = 24\%$$



BIS  
TMD  
translational mode of the BIS (along Y)  
with TMD out of phase

$$T_5 = 2.74 \text{ s}, \bar{M}_{\%x} = 0\%, \bar{M}_{\%y} = 52\%, \bar{M}_{\%z} = 0\%$$

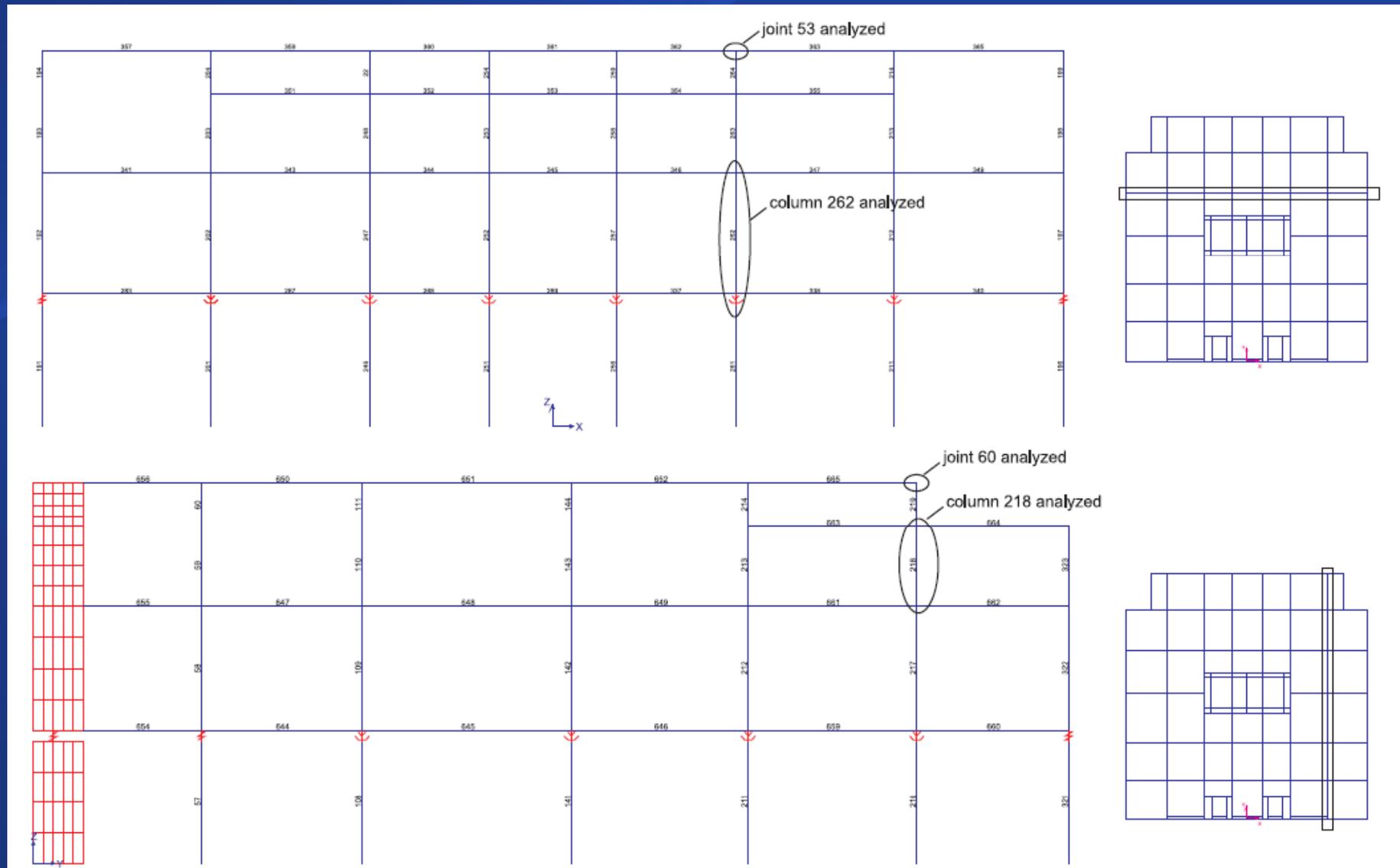


BIS  
TMD  
torsional mode of the BIS (rotation about Z)  
with TMD out of phase

$$T_6 = 1.66 \text{ s}, \bar{M}_{\%x} = 0\%, \bar{M}_{\%y} = 0\%, \bar{M}_{\%z} = 41\%$$

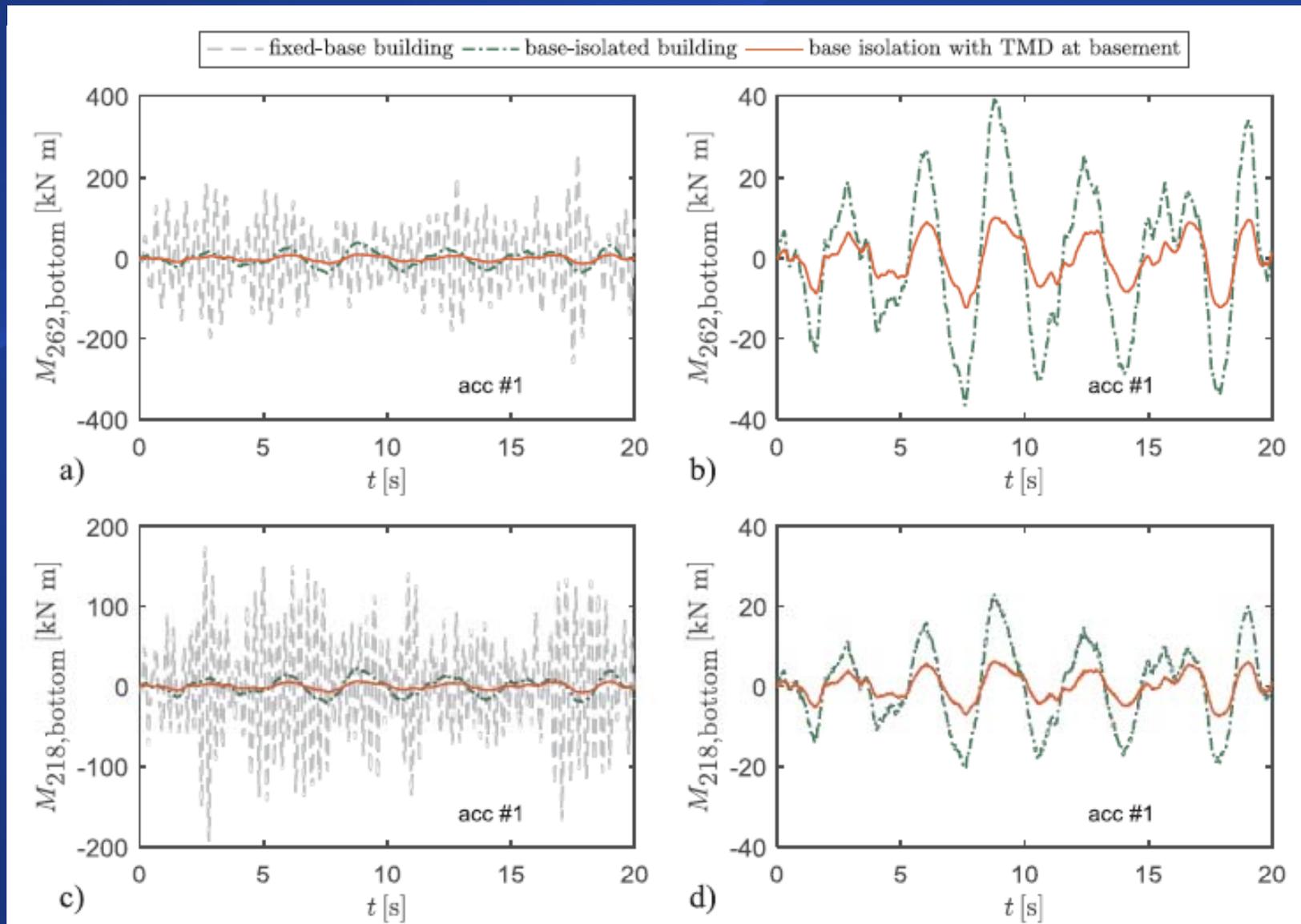
# TMD in accoppiamento al sistema di isolamento

- Elementi oggetto di confronto della risposta sismica



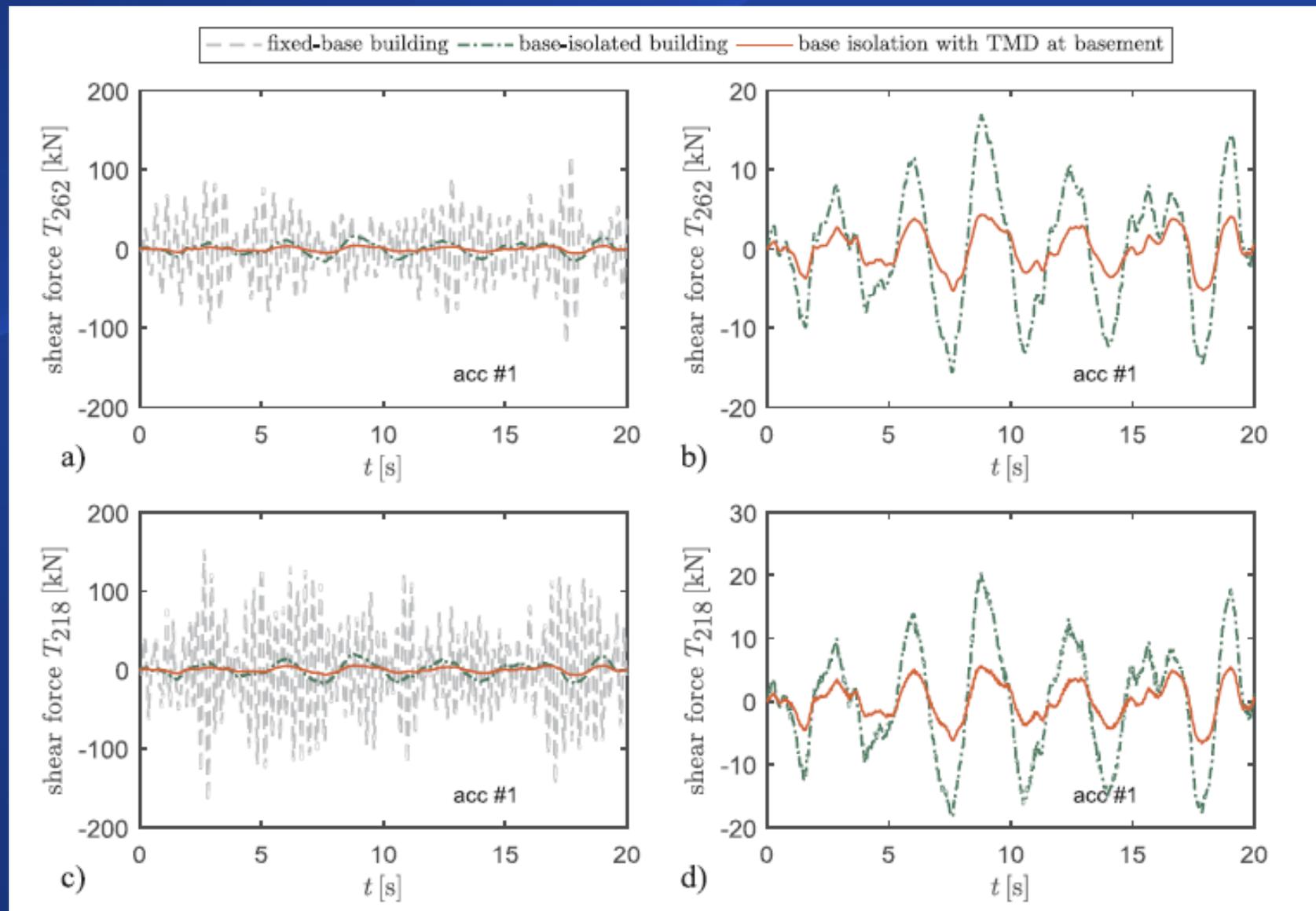
# TMD in accoppiamento al sistema di isolamento

- Momenti alla base dei pilastri selezionati



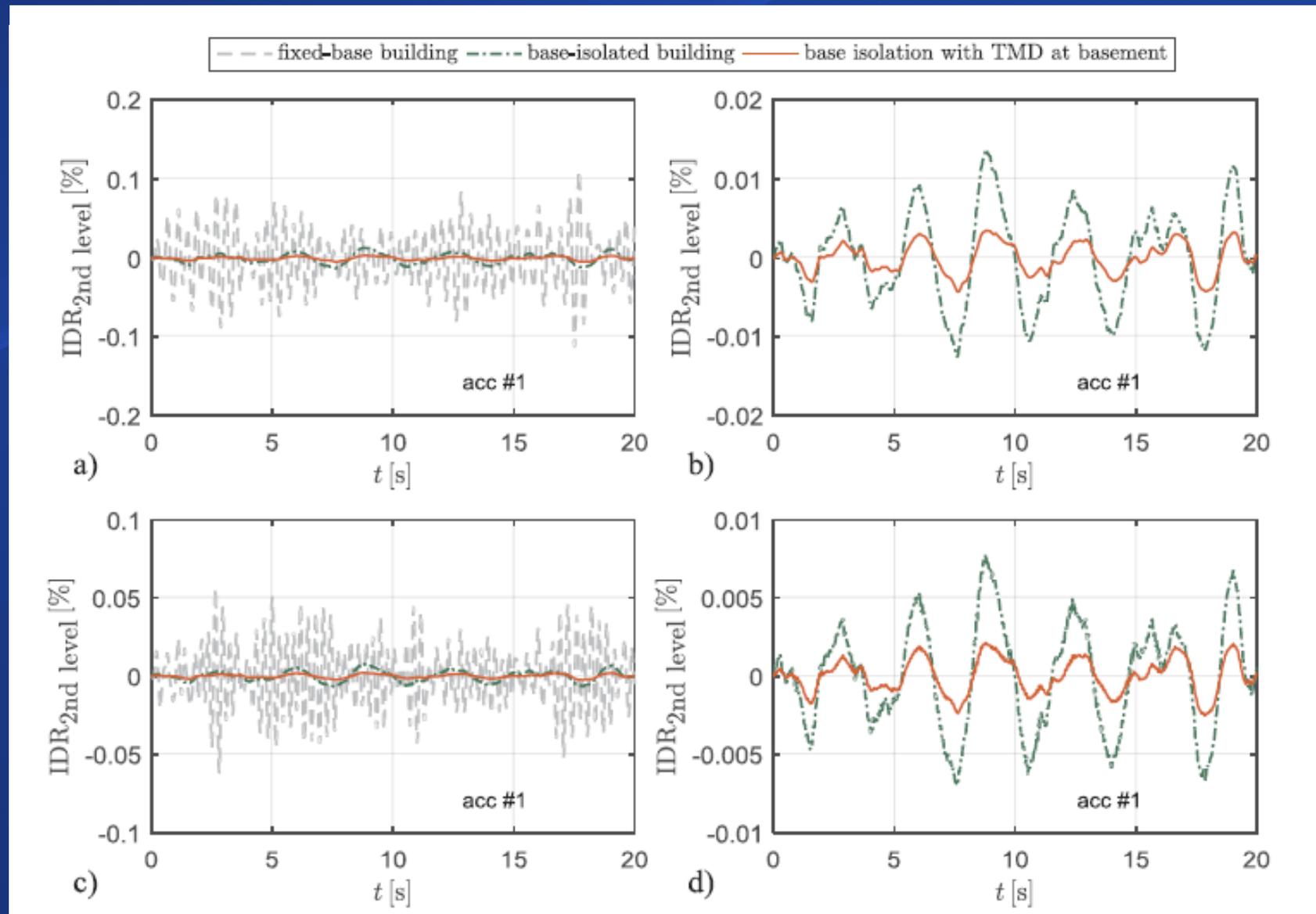
# TMD in accoppiamento al sistema di isolamento

- Tagli alla base dei pilastri selezionati



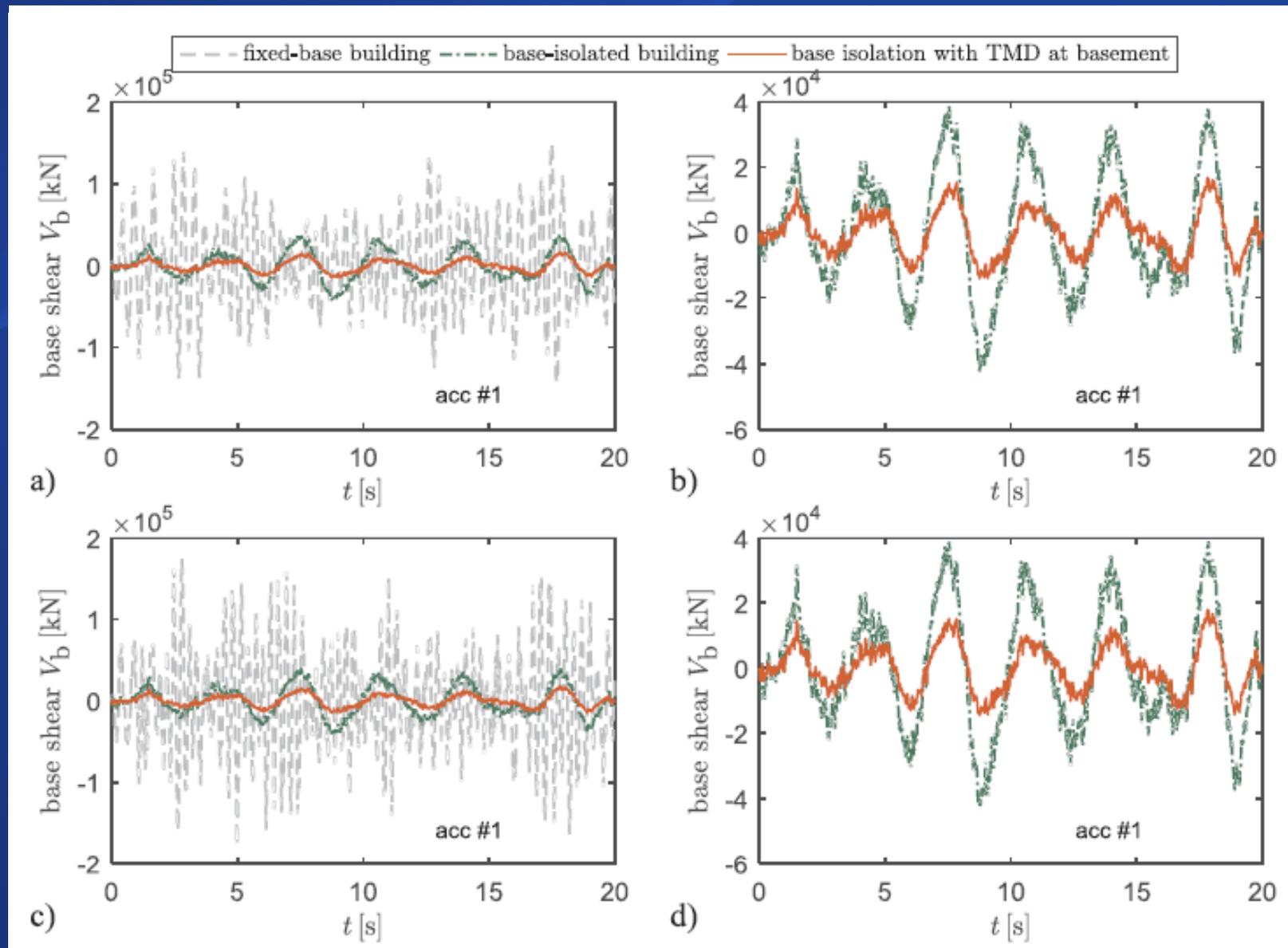
# TMD in accoppiamento al sistema di isolamento

- Spostamenti di interpiano



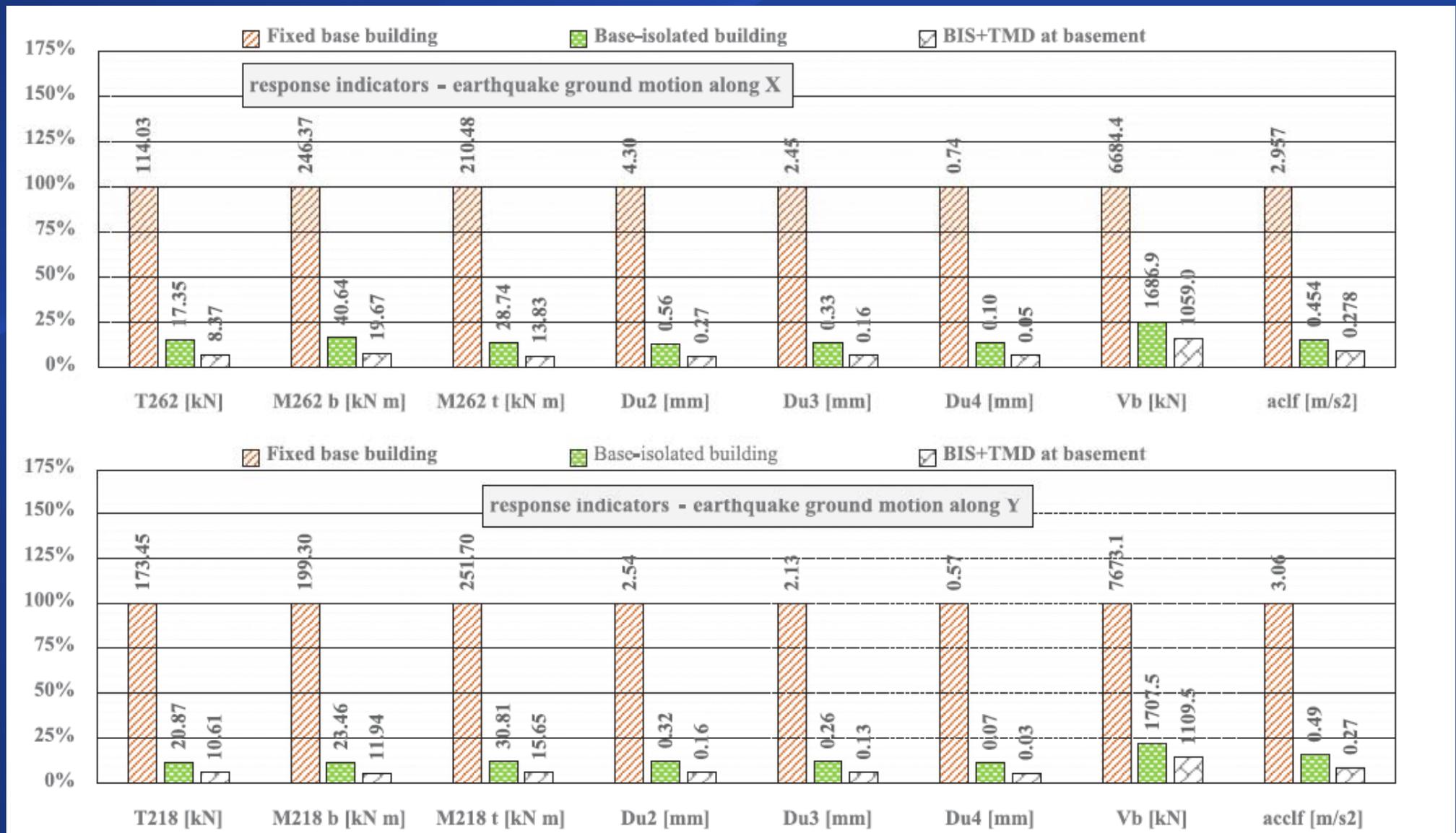
# TMD in accoppiamento al sistema di isolamento

- Taglio alla base



# TMD in accoppiamento al sistema di isolamento

## Confronto



## TMD in accoppiamento al sistema di isolamento

- Il sistema proposto migliora sensibilmente la domanda in spostamento delle strutture isolate alla base convenzionali, il che può essere estremamente vantaggioso per:
  - 1) Adottare isolatori più piccoli (minore dispendio economico);
  - 2) Adottare il sistema di isolamento anche in presenza di aree fortemente urbanizzate con giunto sismico ridotto (si riduce il rischio di martellamento strutturale di edifici contigui);
  - 3) Limitare il danneggiamento delle opere di completamento, degli impianti, ecc.
  
- La tecnica proposta (inserimento del TMD al piano cantinato) risulta maggiormente efficace quando la massa del TMD cresce ...
  
- Occorre sviluppare soluzioni innovative capaci di amplificare la massa ...

## Inconveniente nell'impiego di un TMD

- L'efficacia dell'inserimento di un TMD nel sistema di isolamento dipende significativamente dal rapporto tra la massa del TMD e la massa dell'edificio

$$\mu = \frac{M_{TMD}}{M_{Struttura}}$$

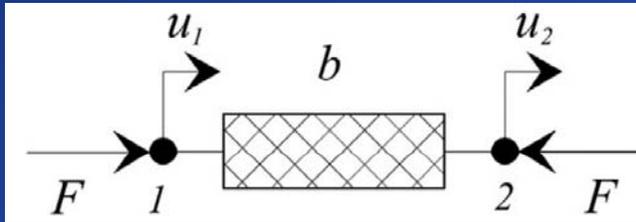
- Perché si abbia un effetto significativo occorre avere la disponibilità di TMD con notevoli masse, ma ciò risulta dispendioso
- È stato messo a punto un dispositivo capace di risolvere egregiamente il problema

**INERTER**



# L'inerter

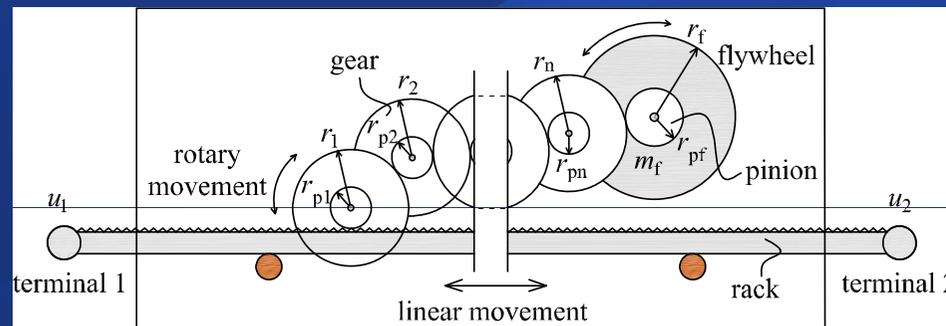
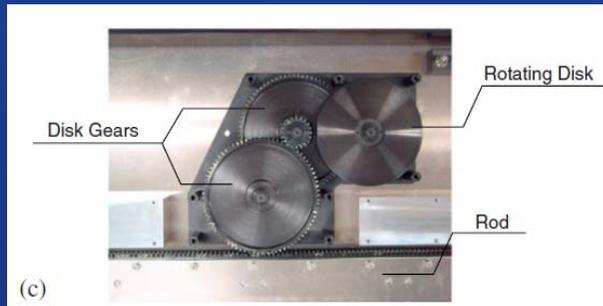
- Dispositivo capace di produrre una forza dipendente dalla velocità



$$F = b(\dot{u}_1 - \dot{u}_2)$$

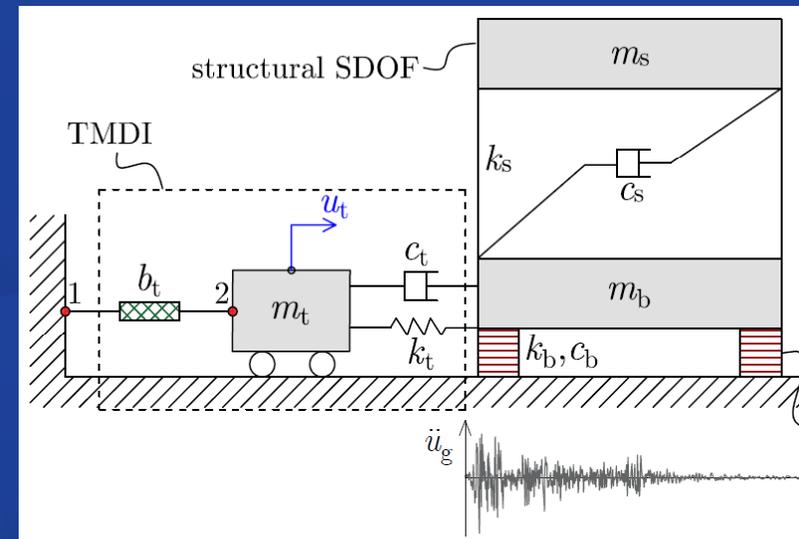
**INERTANZA** (ha le dimensioni di massa [kg])

- Effetto di amplificazione della massa del dispositivo (giocando sui rapporti tra l'inertza traslazionale e quella rotazionale)



## TMDI accoppiato al sistema di isolamento

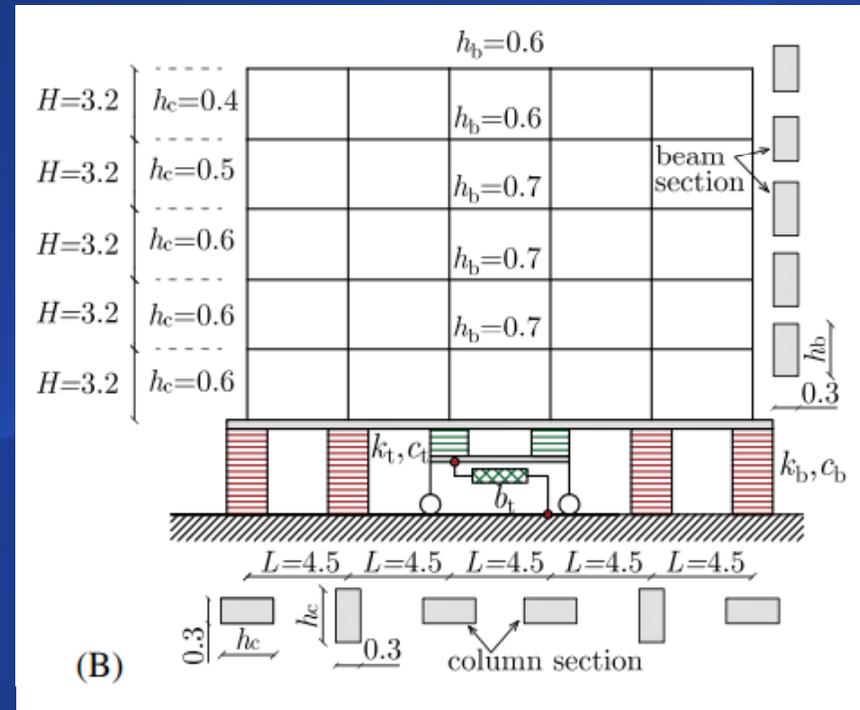
- Un dissipatore a massa e inerzia accordata (TMDI) può risultare ancora più efficace del TMD
- Si sfrutta l'inerzia per amplificare la massa del TMD → tuned mass damper inerter TMDI



### Vantaggi del sistema:

- Si può ottenere una grande massa apparente con una piccola massa fisica;
- Gli spostamenti del TMD sono ridotti a parità di rapporto di massa;
- Le accelerazioni della struttura in elevazione sono ridotte in confronto al sistema TMD di pari massa.

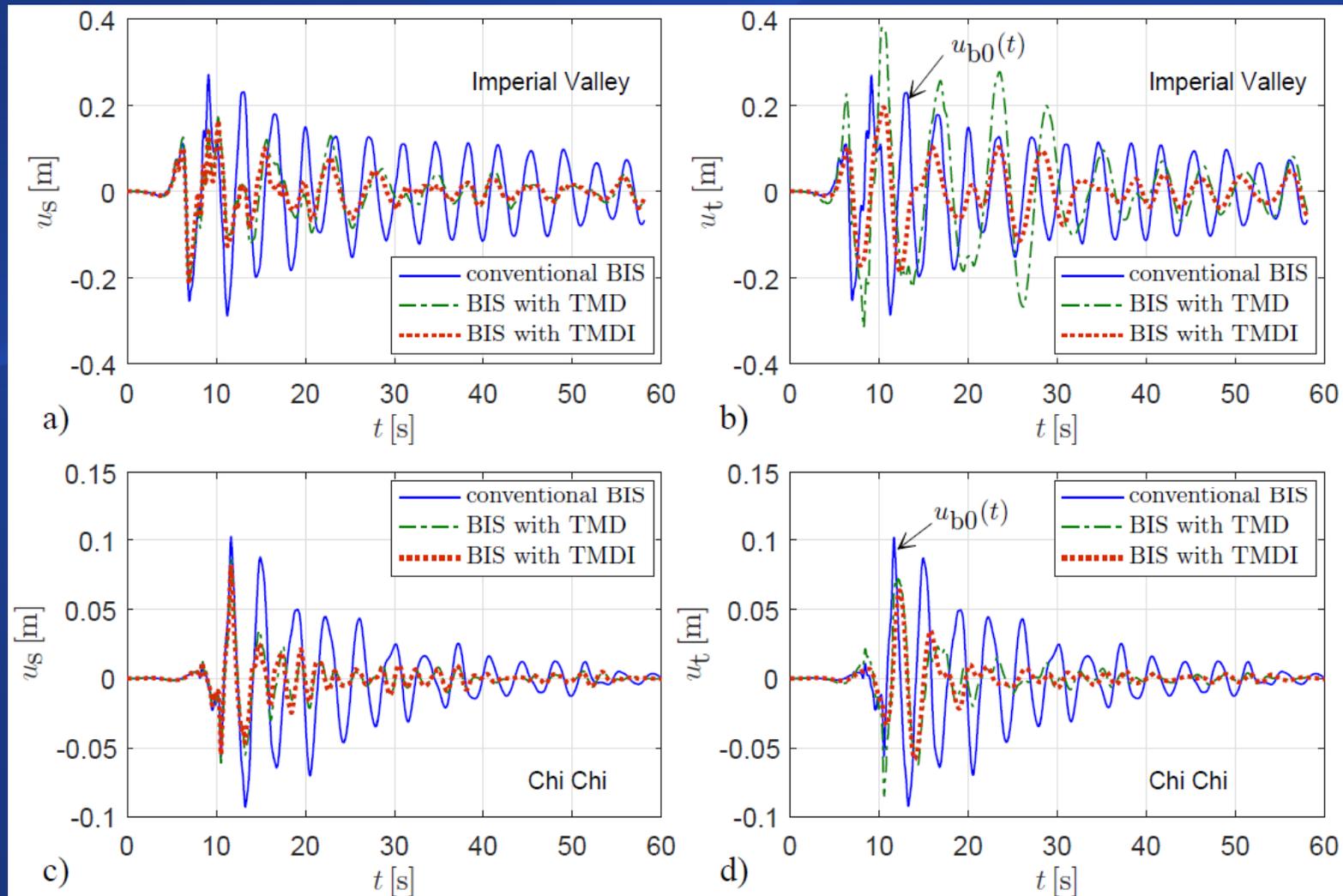
# TMDI accoppiato al sistema di isolamento



*Risultati ottenuti: la performance sismica migliora, e lo stroke del TMD è notevolmente contenuto grazie all'inerter*

passive vibration control system	superstructure-related response indicators						BIS disp. $u_b$ [m] · 10 <sup>-2</sup>	TMD/TMDI stroke $u_t$ [m] · 10 <sup>-2</sup>
	last-floor disp. $u_{s5}$ [m] · 10 <sup>-2</sup>	2 <sup>nd</sup> interstory drift $\Delta u_{s2}$ [m] · 10 <sup>-4</sup>	4 <sup>th</sup> floor acceleration $\ddot{u}_{s4tot}$ [m/s <sup>2</sup> ] · 10 <sup>-2</sup>	base shear $V_b$ [kN]	kinetic energy $T_s$ [kJ]	strain energy $E_s$ [N m]		
conventional BIS	6.51	13.13	64.72	173.99	20.79	946.98	6.00	-
<b>BIS with TMDI</b> ( $\mu_t = 0.01, \beta_t = 0.40$ )	<b>2.86</b> (-55.9%)	<b>6.41</b> (-51.2%)	<b>37.30</b> (-42.4%)	<b>83.05</b> (-52.3%)	<b>5.49</b> (-73.6%)	<b>231.96</b> (-75.5%)	<b>2.61</b> (-56.4%)	<b>4.03</b> (-32.8%)
BIS with conventional TMD ( $\mu_t = 0.1$ )	4.24 (-34.8%)	8.49 (-35.3%)	44.57 (-31.1%)	112.09 (-35.6%)	9.90 (-52.4%)	396.81 (-58.1%)	3.91 (-34.8%)	11.39 (+89.9%)
<b>BIS with non-conventional TMD</b> ( $\mu_t = 0.41$ )	<b>3.32</b> (-48.9%)	<b>6.36</b> (-51.5%)	<b>35.89</b> (-44.5%)	<b>83.67</b> (-51.9%)	<b>6.53</b> (-68.6%)	<b>223.97</b> (-76.3%)	<b>3.07</b> (-48.8%)	<b>6.44</b> (+7.4%)

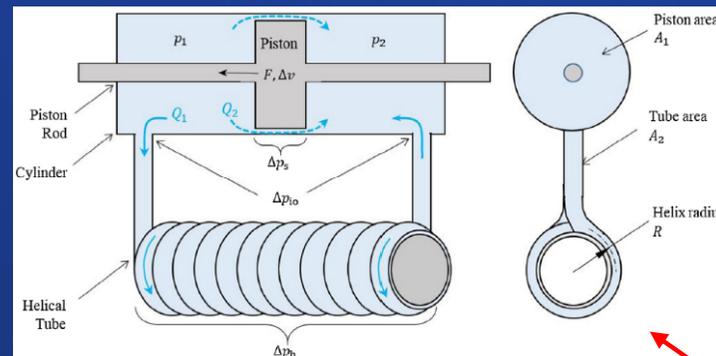
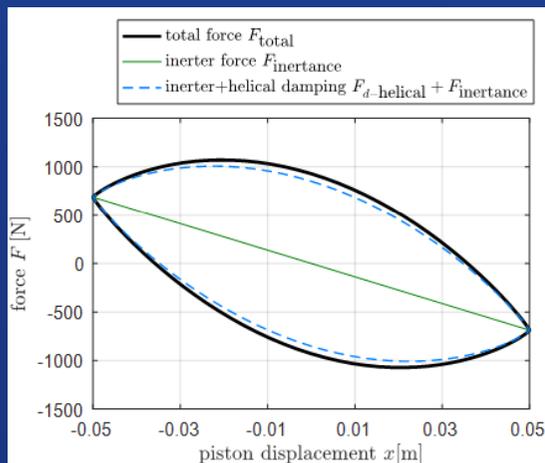
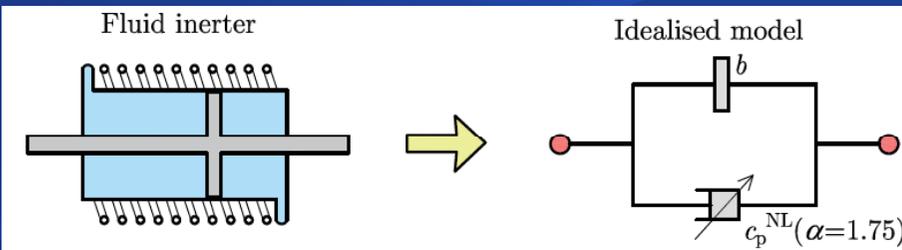
# TMDI accoppiato al sistema di isolamento



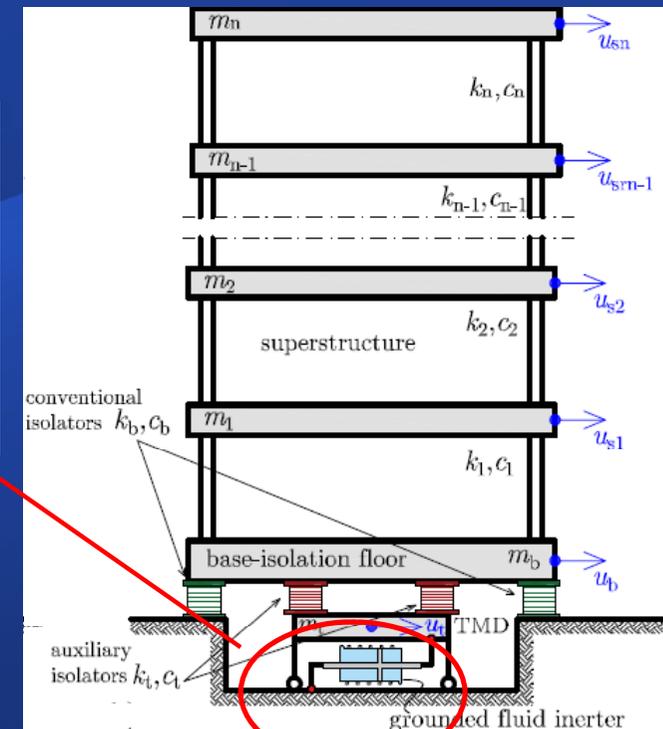
# Inerter a fluido - Sperimentazione

## TUNED MASS DAMPER + INERTER

Nuovo tipo di inerter con meccanismo idraulico → fluid inerter  
Sulla base di prove sperimentali condotte all'Università di Sheffield, UK, si è constatato che questo dispositivo può modellarsi come un inerter in parallelo con un dispositivo di dissipazione viscosa non lineare



Questo schema strutturale abbate gli spostamenti e le accelerazioni assolute di circa il 40-50% rispetto al sistema di isolamento convenzionale



# EUROLAB (Università di Messina)

Banco per prove di fatica su cavi

Laminar box (Geotecnica sismica)



**Grazie per  
l'attenzione !!**